

В. А. ЗЛОБИН, В. А. АНДРЕЕВ, Ю. С. ЗВОРОНО

ФЕРРИТОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

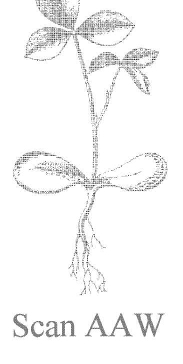
МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

Выпуск 726

В. А. ЗЛОБИН, В. А. АНДРЕЕВ, Ю. С. ЗВОРОНО

ФЕРРИТОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

(ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА)





«ЭНЕРГИЯ»
Ленинградское отделение
1970

УДК 549.73
6П2.1.06
З-68

З68 В. А. Злобин, В. А. Андреев, Ю. С. Звороно

Ферритовые материалы. Л., «Энергия», 1970.
112 с. с рис. 25000 экз.

В книге даются общие сведения о физико-механических свойствах ферритовых материалов, приводятся данные по прочностным и деформационным характеристикам, по влиянию механических нагрузок на их электромагнитные свойства. Описывается методика механических испытаний ферритов. Книга рассчитана на широкий круг специалистов, работающих в области проектирования и эксплуатации радиоэлектронной аппаратуры на ферритах

3-3-10
433-70

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

Латинский алфавит

A — работа механическая;
a — удельная ударная прочность;
a_0 — магнитострикция динамическая;
B — индукция магнитная;
B_m — индукция магнитная максимальная;
B_s — индукция магнитная при техническом насыщении;
B_r — индукция магнитная остаточная;
b — ширина образца;
d — диаметр образца;
E_n — модуль нормальной упругости (Юнга);
E — энергия потенциальная;
E_σ — энергия магнитоупругая;
F — площадь поперечного сечения образца;
f — частота переменного тока;
$f_{пр}$ — частота резонансная продольных механических колебаний;
$f_{кр}$ — частота резонансная крутильных механических колебаний;
$f_{из}$ — частота собственных изгибных колебаний стержня;
G — модуль сдвига;
g — ускорение силы тяжести;
H — напряженность магнитного поля;
H_c — коэрцитивная сила;
$H_т$ — напряженность магнитного поля трогания;
h — высота сечения образца;
I_p — полярный момент инерции сечения образца;
I_y — момент сечения стержня относительно оси y;
I_s — намагниченность насыщения;
K_1 — константа кристаллографической магнитной анизотропии;
$\kappa_ф$ — коэффициент формы сечения образца;
$\kappa_т$ — коэффициент тензочувствительности тензометра;
L, l — длина образца;
$l_{расч}$ — длина образца расчетная;
$M_{кр}$ — момент крутящий;
$M_{кр. макс}$ — момент крутящий максимальный;
$M_{макс}$ — момент изгибающий максимальный;
m — коэффициент первой гармоники поперечных механических колебаний стержня;

N — коэффициент размагничивания;
P — механическая нагрузка (усилие);
$P_{макс}$ — механическое усилие максимальное;
p — давление;
Q — добротность материала сердечника;
R — сопротивление электрическое;
r — радиус образца;
T — температура по термодинамической шкале;
t — температура по стоградусной шкале;
t_s — время перемагничивания;
v — объем образца;
$v_{обр}$ — скорость распространения ультразвуковых колебаний в образце;
$v_{эт}$ — скорость распространения ультразвуковых колебаний в эталонной жидкости;
v_n — скорость распространения поперечных колебаний;
W — момент сопротивления площади поперечного сечения образца;
W_p — полярный момент сопротивления поперечного сечения образца.

Греческий алфавит

α — коэффициент прямоугольности петли гистерезиса;
α_i — направляющий косинус вектора намагничивания относительно тетрагональной оси кристалла;
β_i — направляющий косинус вектора измерения длины относительно тетрагональной оси кристалла;
δ — коэффициент полных потерь;
ε — деформация продольная, относительное удлинение образца;
ε_1 — деформация поперечная, относительное сужение образца;
θ — угол между векторами механического напряжения и намагниченности насыщения;
λ — магнитострикция;
$\lambda_{\parallel}$ — магнитострикция продольная;
$\lambda_{\perp}$ — магнитострикция поперечная;
λ_s — магнитострикция насыщения;
λ_{100} — магнитострикция насыщения в направлении ребра куба;
λ_{111} — магнитострикция насыщения в направлении диагонали куба;
μ — магнитная проницаемость вещества;
$\mu_т$ — магнитная проницаемость тела;
$\mu_н$ — магнитная проницаемость начальная;
$\mu_и$ — магнитная проницаемость импульсная;
μ_σ — магнитная проницаемость механически напряженного образца;
γ — угол сдвига;
ν — коэффициент Пуассона;
ρ — плотность вещества;
ρ_x — плотность вещества рентгеновская;

σ — напряжения механические нормальные;
σ_+ — напряжения механические растягивающие;
σ_- — напряжения механические сжимающие;
$\sigma_{\parallel}$ — напряжения механические, действующие параллельно к намагничивающему полю;
$\sigma_{\perp}$ — напряжения механические, действующие перпендикулярно к намагничивающему полю;
σ_i — напряжения механические внутренние;
σ_z — напряжения механические суммарные;
$\sigma_{расч}$ — напряжения механические расчетные;
$\sigma_р$ — предел прочности при растяжении;
$\sigma_{сж}$ — предел прочности при сжатии;
$\sigma_{из}$ — предел прочности при изгибе;
$\sigma_{уст. пар}$ — предел устойчивости электромагнитных параметров;
$\sigma_{упр. пар}$ — предел упругости электромагнитных параметров;
ω — объемная магнитострикция;
$\omega_р$ — резонансная частота электромагнитного поля;
τ — напряжения механические касательные;
$\tau_{кр}$ — предел прочности при кручении;
$\varkappa$ — восприимчивость магнитная;
γ — удельный вес материала.

ВВЕДЕНИЕ

Два последних десятилетия характерны быстрым развитием радиоэлектроники и усиленным внедрением ее в промышленность. В большинстве современных радиоэлектронных схем нашли широкое применение различные виды изделий из ферритов. Магнитномягкие ферриты широко используются в телевидении, радиорелейных системах связи, электронной и атомной технике. Из магнитномягких ферритов изготовляются сердечники миниатюрных катушек индуктивности, импульсных трансформаторов, волноводов и т. д. Ферриты с прямоугольной петлей гистерезиса применяются в электронных вычислительных машинах, автоматике. Из магнитножестких ферритов бария изготовляются постоянные магниты телефонов, измерительных приборов и др. Детали из ферритов, как и вся радиоэлектронная аппаратура, часто подвергаются механическим, тепловым, вибрационным и другим воздействиям. Вопросы надежности работы радиоэлектронной аппаратуры привели к необходимости исследования механических свойств ферритов.

В настоящее время прочностные свойства ферритов изучены еще явно недостаточно. Определены некоторые механические характеристики для небольшой группы магнитномягких, бариевых ферритов и ферритов типа «гранат», причем результаты получены только при определенных условиях испытаний, а данные различных авторов носят весьма разноречивый характер.

В табл. 1 приведены основные механические характеристики некоторых систем ферритов, по литературным данным.

Обзор литературы показывает, что ни один автор не указал полностью механических свойств хотя бы одной из систем ферритов, а сообщаемые данные весьма неполны и недостаточны.

Таблица 1

Механические характеристики ферритов по литературным данным

Литература	Марка или система феррита	Прочность при			Модуль Юнга $E\ 10^{-6}$ $кГ/см^2$	Модуль сдвига $G \cdot 10^{-5}$ $кГ/см^2$	Коэффициент Пуассона ν
		растяжении $\sigma_р$, $кГ/см^2$	сжатии $\sigma_{сж}$, $кГ/см^2$	изгибе $\sigma_и$, $кГ/см^2$			
ЕВСЕЕВ В. И. Ферриты. «Электричество», 1955, № 9	Никель-цинковые	180	—	—	1,5	—	—
Каталоги фирм Polfer, SH и Philips	Марганец-цинковые	170—400	5000—10000	—	1,0—1,6	—	—
ФАКТОР З., ГРОУДНЫЙ Л., СТАРЫЙ И., ТИШЕР З. Магнитномягкие материалы. «Энергия», 1964	Марганец-цинковые	180	730	—	1,2	—	—
«Новости зарубежной электронной техники», № 6, март, 1968	Марганцевый, магниевый материал	400	3000	1700	—	—	—
ШОЛЬЦ Н., ПИСКАРЕВ К. А. Ферриты для радиочастот. «Энергия», 1966	С проницаемостью 1000—2000	130—180	2700—5800	—	0,92—1,6	—	—
Д. Б. САЛИТРА. «Вопросы радиоэлектроники». 1963. Серийные детали и компоновка радиоаппаратуры, вып. 1	Никель-цинковые	—	—	—	1,6—1,7	6,47—6,63	0,26—0,3
Van der Burgt K. M.	Никель-цинковые (колебания продольные)	—	—	—	0,3—1,8	—	0,2—0,34
Philips Res. Rev., 1953, 8, 91	Никель-цинковые (крутильные колебания)	—	—	—	—	3,6—6,8	0,27—0,32

Важнейшими механическими свойствами физических тел, прежде всего твердых тел из различных материалов, являются: вязкость, упругость, пластичность, прочность. Они определяют способность тел сопротивляться деформации и разрушению под действием внешних сил, а также возможность использования материалов в качестве деталей конструкций [1].

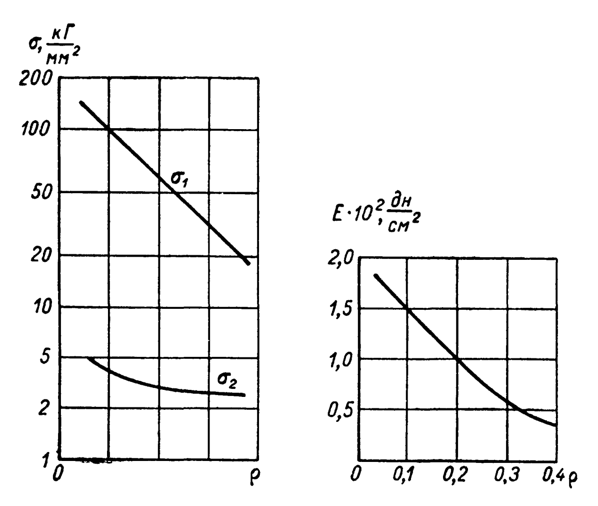


Рис. 1. Зависимость прочности и модуля Юнга от пористости ферритов.

Механические свойства тел связывают с их структурным строением, строением не только кристаллической решетки, но и дисперсной структурой обычного мелкозернистого кристаллического твердого тела, представляющего собой сросток отдельных более или менее беспорядочно расположенных кристаллов различных размеров, а также с пористостью тел — открытой пористостью, состоящей из сети каналов (капилляров) различных размеров и форм, и замкнутой пористостью, определяющейся ячейками и микрополостями, практически не сообщающимися друг с другом.

В работах Смита и Вейна [2] приведены зависимости прочности некоторых структур феррита от пористости (рис. 1). Графики получены для образцов с сечением 2×3 *мм*. Величины получившихся напряжений не будут

соответствовать действительным значениям пористости изделий, так как размер поперечного сечения образца взят недостаточно большой, и поэтому не учтено влияние масштабного фактора. В действительности в литературе [2] уже встречаются указания, что эти величины напряжений следует уменьшить в 2—3 раза для образцов с большей площадью поперечного сечения.

Для твердых тел различного рода характерна структура, образуемая сцеплением друг с другом атомов, молекул и коллоидных частиц. Такая структура, определяющая упругость и прочность тел, в истинно твердых телах представляет собой кристаллическую решетку.

В то же время можно отметить, что беспорядочность структуры — отсутствие в ней дальнего порядка при наличии ближнего порядка, как, например, у радиокерамики и ферритов, всегда приводит к повышению прочности (противоположным примером может служить слюда, имеющая упорядоченную структуру в одном направлении). Такие «беспорядочные» структуры возможно создать более интенсивным разрушением структуры исходного материала, хотя это связано с большими трудностями, которые проявляются прежде всего через масштабный фактор, поскольку более мелкие частицы разрушаются труднее.

Чтобы создавать прочные детали, такое разрушение исходного материала необходимо, так как оно служит основой того, что при дальнейшем прессовании деталей произойдет значительное уплотнение, а следствием этого будет повышение прочности. Надо отметить, что большую роль при создании из порошка готовых деталей играет *пластификатор,* повышающий пластичность порошка (шихты) настолько, чтобы сделать возможным формирование деталей. При неравномерном распределении пластификатора по объему шихты наблюдается неоднородность последней, что приводит к некоторым дефектам, которые проявляются в виде трещин, искажений формы изделий, неравномерности усадки в различных его участках, а это приводит не только к понижению прочности, но и к ухудшению магнитных свойств ферритов.

Недостаточно полно освещен вопрос о влиянии механических нагрузок на изменение магнитных и других характеристик ферритов. Встречающиеся в литературе

данные разбросаны по различным изданиям и хотя перечислены причины появления в изделиях из феррита внутренних напряжений, но влияние их на магнитные и электрические свойства освещены явно недостаточно.

Напряжения могут возникнуть: а) от приложения внешних усилий; б) в результате пластической деформации при термической или механической обработке материалов, а также при наличии примесей; в) в результате магнитострикции.

Под действием механических нагрузок магнитные свойства большинства ферромагнитных материалов изменяются настолько значительно, что механические напряжения наряду с напряженностью магнитного поля и температурой могут считаться одним из основных факторов, влияющих на магнитные свойства вещества [3].

При появлении в ферромагнитном образце напряжений в нем даже при отсутствии внешнего поля происходят магнитные процессы. Как утверждает Белов [4], эти процессы состоят в том, что упругая деформация вызывает перераспределение направлений самопроизвольной намагниченности областей, а также изменение ее абсолютной величины. Эти процессы сопровождаются дополнительной деформацией ферромагнитного тела магнитострикционной природы. При этом отмечается отклонение от закона Гука.

В настоящей работе изложены вопросы методики и приведены механические характеристики некоторых марок магнитномягких, бариевых ферритов и ферритов типа «гранат», а также рассмотрены вопросы влияния напряженного состояния ферритов на их магнитные и электрические параметры. В ней использованы экспериментальные материалы, полученные кафедрой сопротивления материалов ЛЭТИ им. В. И. Ульянова (Ленина).

В исследованиях механических свойств ферритов принимали участие В. Р. Дуровкин, Ю. А. Шукейло, Г. А. Дашук, В. Г. Короткин и К. И. Воловодов. Всем им авторы выражают свою благодарность. Они признательны также К. В. Соляник-Красса, Н. Д. Горбунову и Г. А. Матвееву за помощь в научно-исследовательской работе.

Глава первая

МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФЕРРИТОВ

§ 1. Основные положения

Целью механических испытаний ферритов является изучение деформаций образцов материалов при механических воздействиях и определение величин механических напряжений, вызывающих разрушение образцов. Механические свойства материалов — способность материалов сопротивляться деформированию и разрушению в сочетании со способностью упруго и пластически деформироваться под действием внешних механических сил.

Измерение механических характеристик различных материалов, в том числе ферритов, имеет большое практическое значение, так как при конструировании, сборке и эксплуатации различных аппаратов, приборов, волноводов и других устройств, детали, изготовленные из ферритов, могут подвергаться механическим усилиям, хотя иногда и кратковременным, но значительным по величине.

По отношению к действию механических нагрузок и по условиям, при которых происходит разрушение, можно все материалы разделить на пластичные и хрупкие. Если материал разрушается при весьма малых деформациях (2—3%), то его называют *хрупким*. Если же разрушение при растяжении происходит при значительных деформациях (20—30%), а при сжатии и вовсе не наступает, то такой материал называется *пластичным*.

Однако необходимо учесть, что такое разделение материалов является не вполне строгим и лучше гово-

рить о пластичных и хрупких свойствах материалов, ибо одни и те же материалы в зависимости от физических условий, в которых они находятся, могут быть и в хрупком и в пластичном состоянии.

По своим механическим свойствам в диапазоне рабочих температур ($-100 \div +125^\circ$ C) ферриты относятся к хрупким материалам, так как деформации при разрушении достигают порядка 0,03—0,2%.

Создание напряженного состояния материала во время испытаний должно по возможности соответствовать тем условиям, в которых находятся детали или образцы при эксплуатации. Поэтому испытания материалов подразделяют сообразно видам нагружения, которым подвергаются образцы в процессе исследования.

Основные виды механических испытаний ферритов следующие: 1) статические испытания на растяжение, сжатие, изгиб, кручение; 2) динамические испытания на ударную прочность (вязкость); 3) испытания на твердость; 4) определение упругих постоянных динамическим способом.

Необходимо отметить, что при испытаниях образцов из ферритов наблюдался большой разброс результатов. Этот разброс в первую очередь объясняется различными технологическими факторами (различным давлением при прессовании, различием температуры обжига, наличием микротрещин, неоднородной зернистостью и т. д.).

§ 2. Прочность при растяжении

Статические испытания на растяжение позволяют получить одну из важнейших характеристик — *предел прочности* при разрыве образца. Если образец феррита поперечного сечения F ($см^2$) подвергается действию плавно возрастающего растягивающего усилия (рис. 2), то при предельном значении этого усилия $P_{макс}$ происходит разрыв образца.

Предел прочности при растяжении $\sigma_р$ находится из элементарного выражения:

$$\sigma_р = \frac{P_{макс}}{F}. \qquad (1)$$

В литературе применительно к испытаниям хрупких материалов на растяжение чаще всего рассматриваются

типы образцов, приведенные на рис. 3-7. Однако эти образцы при изготовлении их из ферритов имеют ряд существенных недостатков.

В образцах типа (рис. 3) [11] не обеспечивается линейное напряженное состояние (простое осевое растяжение) и лишь одно случайное сечение определяет прочность при разрыве.

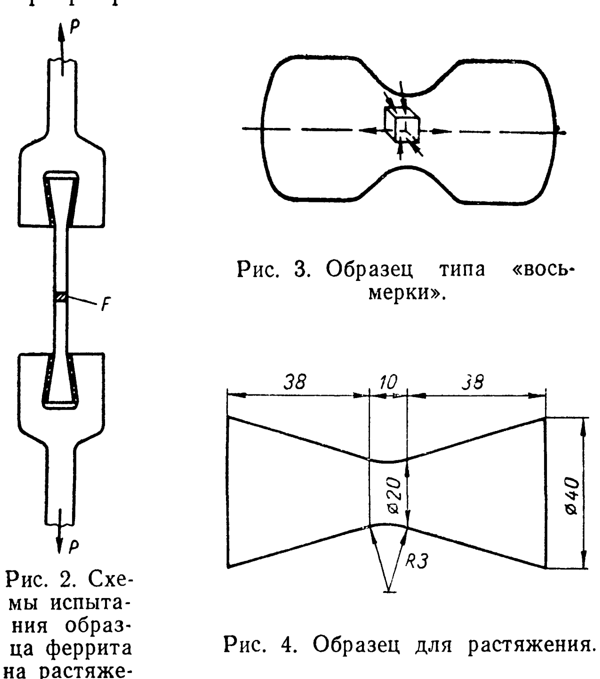


Рис. 2. Схемы испытания образца феррита на растяжение.

Рис. 3. Образец типа «восьмерки».

Рис. 4. Образец для растяжения.

Такое же случайное сечение определяет прочность и в образцах типа (рис. 4) [11].

В образцах типа (рис. 5) из-за местных напряжений и небольшого прямолинейного участка также невозможно получить линейное напряженное состояние, и, кроме этого, лишь небольшая часть объема ($<5\%$) в ослабленном сечении позволяет судить о прочности образца.

Образец типа (рис. 6) [12] лучше отвечает требованиям растяжения хрупких материалов, но сложность его изготовления и необходимость механической обработки затрудняет возможности применения.

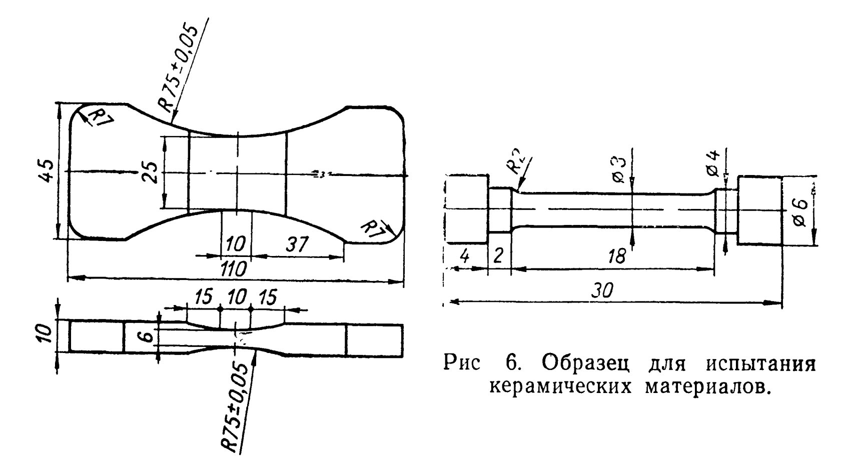


Рис. 5. Образец для растяжения хрупких материалов

Рис 6. Образец для испытания керамических материалов.

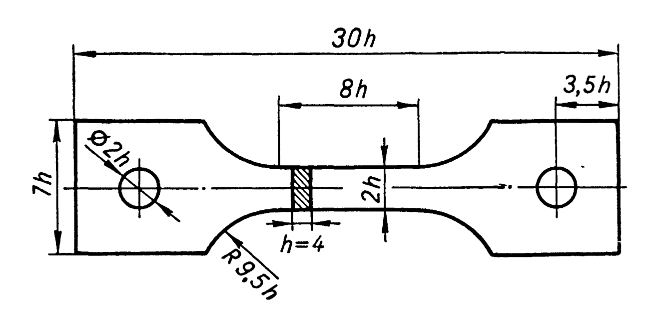


Рис. 7. Образец для испытания хрупких материалов.

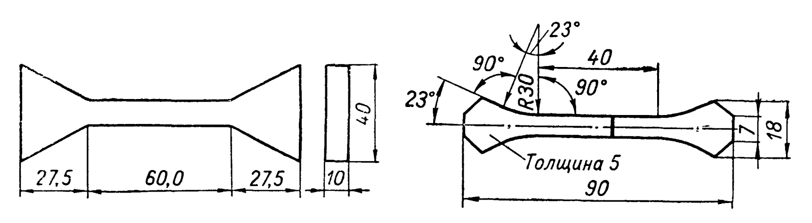


Рис. 8. Образец для растяжения ферритов.

Рис. 9. Образец для испытания хрупких металлокерамических материалов.

Образец типа (рис. 7) [12] по данным большинства исследователей вообще не пригоден для испытания на растяжение хрупких материалов, так как значительная концентрация напряжений около отверстий, через которые передается нагрузка на образец, приводит к разрушению образцов вне рабочей части.

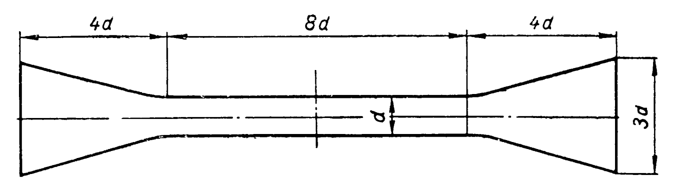


Рис. 10. Образец для испытания хрупких материалов типа «ласточкин хвост».

Форма образца (рис. 8) лучше отвечает требованиям испытания на растяжение ферритов, однако желательно, чтобы отношение длины прямолинейной части образца к наибольшей стороне поперечного сечения было несколько большим.

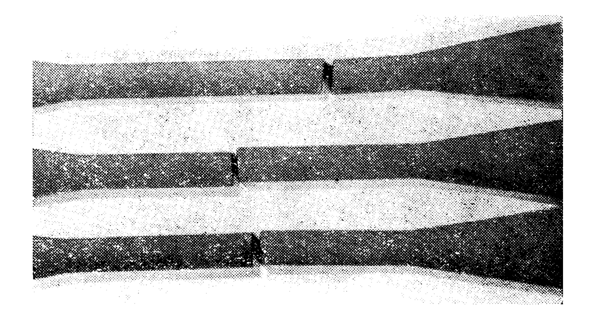


Рис. 11. Вид образцов феррита 20ВЧ, испытанных на растяжение при нормальной температуре.

Вполне удовлетворительные результаты дают испытания образцов типа, показанного на рис. 9 [12] и рис. 10. Испытания образцов типа «ласточкин хвост» (рис. 10) показали, что разрыв абсолютного большинства образцов происходит в рабочей зоне, причем применение центрирующих устройств и правильное изготовление

захватов позволяют добиться линейного напряженного состояния по всей рабочей части образца.

На рис. 11 показаны разрушенные образцы феррита типа 20ВЧ.

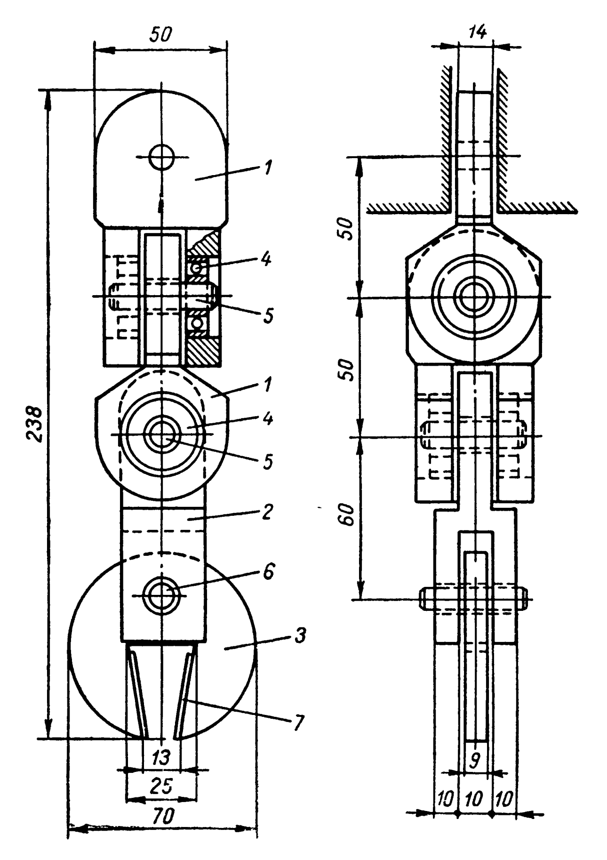


Рис. 12. Самоцентрирующее приспособление для испытания образцов на растяжение.

Для устранения перекосов в захватах и создания осевого нагружения передача усилий на образец производилась с помощью специального центрирующего устройства, устанавливаемого в захватах любой испытательной машины на растяжение.

На рис. 12 показан один из вариантов центрирую-

щего устройства, состоящего из двух центрирующих серег *1*, вилки *2* для установки захватов *3*. Серьги и вилки соединены осями *5* на шарикоподшипниках *4*. За хват с вилкой связаны между собой свободной осью *6*. В захватах сделан клинообразный вырез по форме головки образца. Проведенные испытания показали, что встречаются образцы с изогнутой продольной осью. При испытаниях таких образцов возникают дополнительные напряжения от изгиба

$$\sigma_{из} = \frac{6Pe}{b^2 h}, \qquad (2)$$

где e — эксцентриситет или стрела прогиба.

Погрешность, которая может быть допущена при игнорировании этого фактора:

$$\Delta\sigma = \frac{\sigma_\Sigma - \sigma_p}{\sigma_p} \cdot 100 = \frac{6e}{b} \cdot 100, \qquad (3)$$

где σ_Σ — суммарные напряжения изгиба и растяжения, имеющие место в средней части образца; σ_p — напряжение растяжения.

Так, если у образца $e=0{,}5$ *мм*; $b=8$ *мм*, то $\Delta\sigma=37{,}5\%$.

Исследование влияния температуры на прочность ферритов проводилось в диапазоне температур —100° ÷ +100° С.

Для этих испытаний изготовлена специальная печь, схема которой представлена на рис. 13. Образец *1* вставляется в специально изготовленные из текстолита захваты с клинообразным вырезом *2*. С целью равномерной передачи усилия между головкой образца и наклонными плоскостями захватов помещаются специальные прокладки *3*. Для уменьшения поперечных деформаций в проушины захватов вставляются жесткие стальные рамки *4*. При испытаниях образец вместе с захватами помещается в электронагревательную печь *5*. Ток к печи подводится по проводам *6* и регулируется через ЛАТР. Температура в печи определяется термометром *7*, который вставляется через отверстие *8*. Для уменьшения потерь тепла или холода стенки печи изолируются толстым слоем термоизоляции из асбестовой крошки *9* и асбестового картона *10*. Внутри печи размещается

нагревательная спираль *11*. Охлаждение образцов производится жидким азотом через регулирующий клапан, вставленный в дьюар.

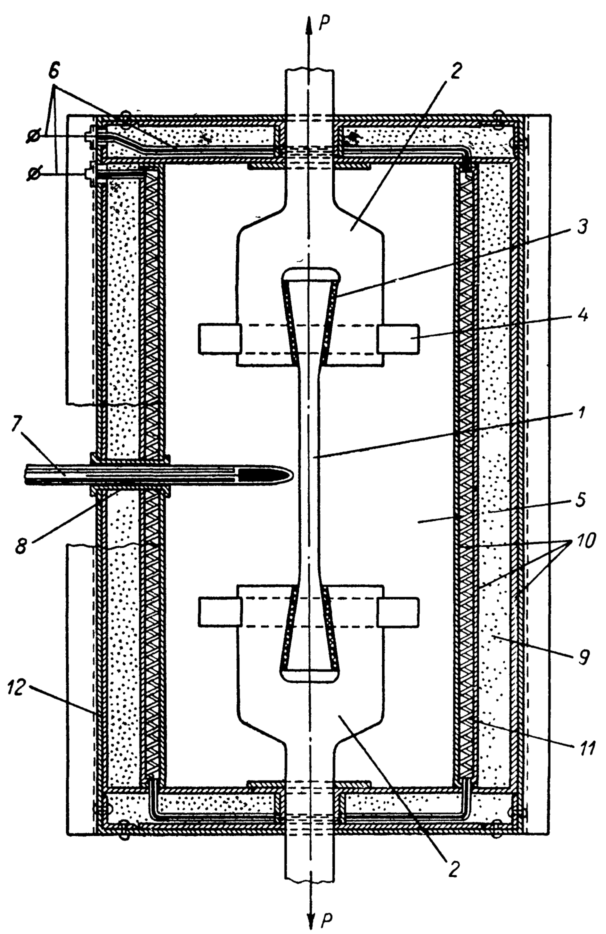


Рис. 13. Устройство для испытания ферритов на растяжение при температурах —100÷+125° С.

Нагревание или охлаждение проводится медленно и постепенно из расчета изменения температуры на ±100° за 1 *ч*. При заданной температуре образец выдерживался 15 *мин*. Как видно из рис. 11, плоскость отрыва сов-

падает с плоскостью поперечного сечения. Наблюдается характерное «хрупкое» разрушение.

На рис. 14 и 15 приведены кривые зависимости прочности от температуры. Как видно из графиков, у всех

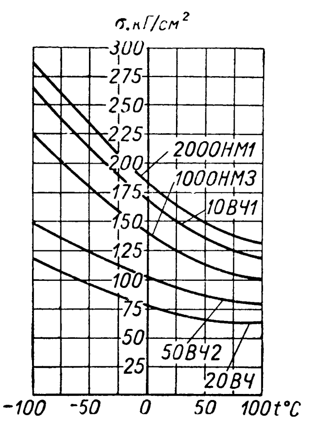


Рис. 14. Зависимость прочности магнитномягких ферритов при растяжении от температуры.

Рис. 15. Зависимость прочности магнитножестких ферритов при растяжении от температуры.

указанных материалов прочность с увеличением температуры уменьшалась.

Таблица 2

Зависимости прочности ($\sigma_р$, *кГ/см²*) при растяжении от изменений температуры некоторых марок ферритов

Марка ферритов	Температура, °C			
	+100	+20	—50	—100
10ВЧ1	115	152	212	265
20ВЧ	63	70	95	120
50ВЧ2	70	95	125	150
1000НМ3	100	120	180	225
2000НМ1	130	160	230	290
1БИ	243	259	293	—
2БА	241	250	313	—
3БА	266	313	420	—

В табл. 2 показаны значения среднего предела прочности при растяжении некоторых марок ферритов при различных температурах.

Наибольшей прочностью обладают магнитножесткие ферриты, имеющие и меньшую пористость. Наименьшей прочностью — ферриты 20ВЧ и 50ВЧ2, имеющие пористость 30—40%.

§ 3. Прочность при сжатии

Прочность при испытании образцов на сжатие во многом зависит от трения между плитами прессов и торцевыми поверхностями образцов. Для испытаний брались образцы цилиндрической формы с постоянным соотношением $h/b=1{,}5$.

Предел прочности при сжатии $\sigma_{сж}$ определяется для образца, разрушаемого плавно возрастающим сжимающим усилием

$$\sigma_{сж}=\frac{P_{макс}}{F}\left[\frac{кГ}{см^2}\right]. \qquad (4)$$

Необходимо отметить, что при оценке прочности ферритовых изделий при сложном напряженном состоянии за критерий, т. е. величину допускаемой нагрузки, нельзя принимать предел прочности при сжатии, так как он у хрупких материалов в несколько раз выше прочности при растяжении.

Для выявления влияния масштабно-технологического фактора испытания проводились на образцах с диаметром $d=20$; 15; 10 *мм* и соответственно с высотой $h=30$; 22,5; 15 *мм*.

Испытания для определения зависимости прочности при сжатии от температуры проводились в специальных печах, показанных на рис. 16.

Образец *1* устанавливается между стальными подушками машины *2*. Печь состоит из цилиндрического металлического каркаса *3*, в верхней и нижней части которого проделаны круговые отверстия для прохода сжимающих цилиндров. Внутри каркаса между двух слоев асбестовых прокладок помещена нагревательная спираль, концы которой выведены на колодки *4*. Нагрев регулируется через ЛАТР. Температура измеряется термопарой *5*, вставленной в печь через отверстие *6*. Для более рав-

номерного нагрева и уменьшения потерь тепла стенки внутри изолируются слоем асбестовой крошки *7* и стекловатой *8*. Между торцевыми поверхностями образца и подушками пресса устанавливаются асбестовые прокладки.

Охлаждение образцов осуществляется жидким азотом, пары которого подаются из сосуда Дьюар через

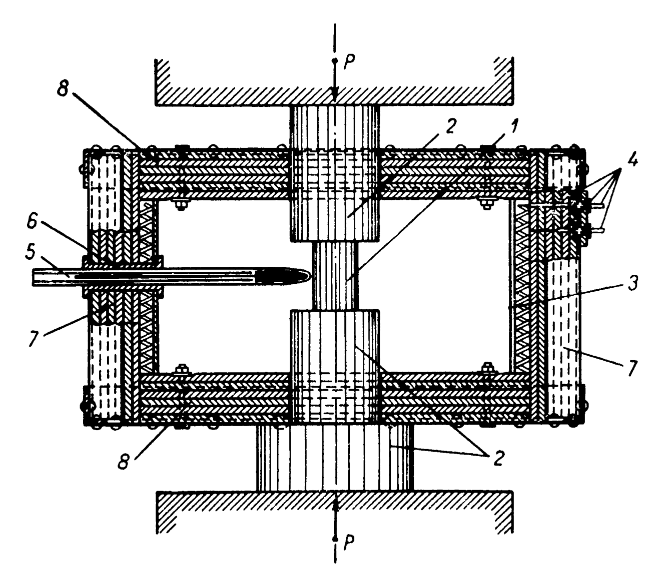


Рис. 16. Установка для испытания ферритов на сжатие при температурах —100 ÷ +125° С

регулирующий клапан и патрубок внутрь камеры печи. Регулирование подачи азота производится путем изменения величины тока, проходящего через нагревательную спираль клапана. Момент разрушения определяется на слух через микрофон-динамик по характерному треску.

Образцы, как правило, разрушались на несколько частей вдоль линии приложения нагрузки. На рис. 17 показан характерный вид разрушения образцов феррита марки 1000НМ3.

В некоторых работах [14] делается попытка привести в соответствие результаты испытаний на растяжение и

сжатие путем подсчета так называемых расчетных напряжений:

$$\sigma_{расч} = E\varepsilon_{\perp} = -\nu E\varepsilon = -\nu\sigma_{сж}, \qquad (5)$$

где E — модуль нормальной упругости; $\varepsilon_{\perp}$ — поперечная деформация.

Однако проведенные испытания ферритов не дали полной корреляции результатов, и величина $\sigma_{расч}$ оказалась завышенной до 1,5 раза.

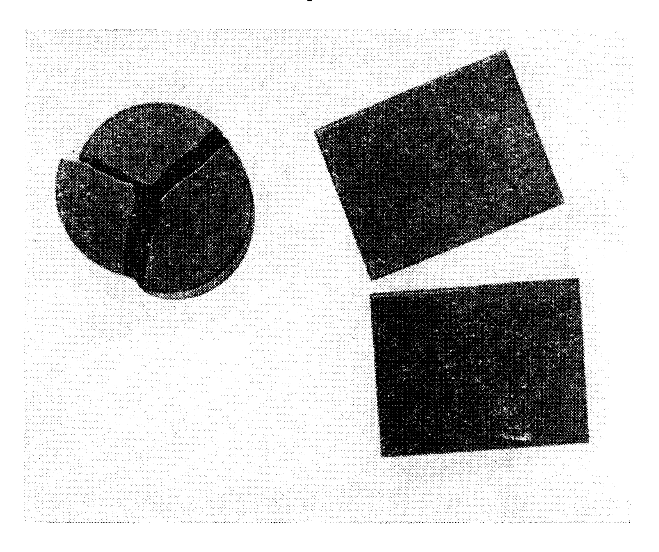


Рис. 17. Вид образцов феррита 1000НМ3, испытанных на сжатие при температуре —50° С.

Из-за трудностей, связанных с исключением трения между торцевыми поверхностями образцов и подушками пресса, а также несоответствия расчетных напряжений на растяжение напряжениям при сжатии, результаты испытаний на сжатие могут служить лишь ориентировочной характеристикой прочности материала, а сами испытания могут применяться только для сравнительной оценки прочности ферритов.

На рис. 18, 19 показаны кривые изменения прочности магнитномягких и магнитножестких ферритов при сжатии в зависимости от температуры. Кривые показы-

вают, что прочность магнитномягких ферритов с повышением температуры несколько увеличивается, а прочность магнитножестких ферритов уменьшается.

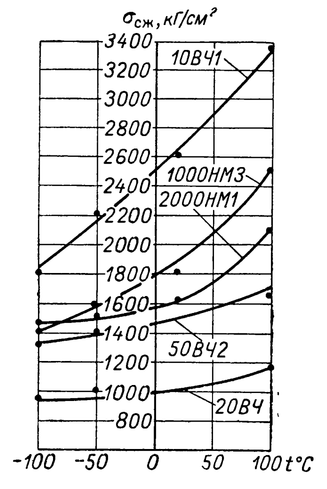


Рис. 18. Зависимость прочности магнитномягких ферритов при сжатии от температуры.

В табл. 3 приведены средние пределы прочности при сжатии некоторых марок ферритов при различных темпера-

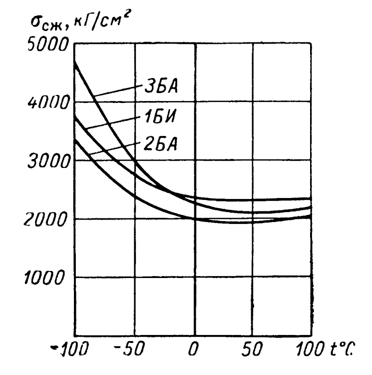


Рис. 19. Зависимость прочности магнитножестких ферритов при сжатии от температуры.

турах. Наименьшей прочностью, как и при растяжении образцов, обладают ферриты 20ВЧ и 50ВЧ2, имеющие наибольшую пористость.

Таблица 3

Зависимость прочности при сжатии ($\sigma_{сж}$, *кГ/см²*) от температуры некоторых марок ферритов

Марка ферритов	Температура, °C			
	+100	+20	—50	—100
10ВЧ1	3300	2600	2220	1800
20ВЧ	1160	1060	1000	960
50ВЧ2	1650	1560	1400	1300
1000НН3	2500	1680	1600	1400
2000НМ1	2000	1600	1500	1460
1БИ	2270	2290	2730	3760
2БА	2020	1950	2330	3270
3БА	2200	2170	2900	—

В табл. 4 показаны средние пределы прочности при сжатии ферритовых образцов в зависимости от масштабно-технологического фактора.

Таблица 4

Зависимость прочности при сжатии ($\sigma_{сж}$, *кГ/см²*) от масштабно-технологического фактора

Марка ферритов	Размеры образцов, *мм*		
	$d = 20$ $h = 30$	$d = 15$ $h = 22{,}5$	$d = 10$ $h = 15$
20ВЧ	1060	1800	2200
50ВЧ2	1560	1700	1850
1000НМ3	1580	1700	1850
2000НМ1	1600	1750	1950
1БИ	2290	2420	2610
2БА	1950	2210	2320
3БА	2170	2660	3040

Характерно, что при испытаниях на сжатие, как и при других видах испытаний ферритов, разброс результатов при низких температурах гораздо меньше, чем при повышенных. Так, например, если для ферритов марки 10ВЧ1 разброс результатов при $t = +100°$ С был $\sigma_{сж} = 2400$—4200 *кГ/см²*, то при $t = -100°$ С $\sigma_{сж} = 1500$—1900 *кГ/см²*.

На рис. 20 и 21 приведены зависимости прочности при сжатии магнитномягких и магнитножестких ферритов от объема образца.

Из физических соображений очевидно, что однородное поле напряжений, возникающее при сжатии цилиндрического образца, распространено практически по всему его объему. При этом прочность определяется числом микродефектов, находящихся в данном объеме, а также величиной «ослабления» материала, вносимого каждым отдельным дефектом. Если принять, что на единицу объема материала приходится примерно одинаковое количество дефектов одинаковой «силы», то становится очевидным, что с увеличением размеров образца повышается вероятность появления дефектов, существенно отличающихся от среднего уровня «силы». При

этом становится более вероятным появление как весьма «слабых», так и весьма «сильных» дефектов.

Если первые на прочность не окажут влияния (так как прочность образца определяется прочностью «слабого места»), то появление более «сильных» дефектов вызовет в среднем снижение прочности в совокупности образцов большего объема. Это положение достаточно

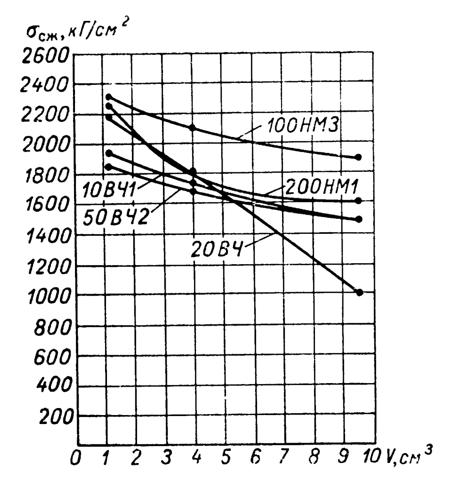


Рис. 20. Зависимость прочности магнитномягких ферритов при сжатии от объема образца.

Рис. 21. Зависимость прочности магнитножестких бариевых ферритов при сжатии от объема образца.

отчетливо иллюстрируется результатами испытаний, приведенными на рис. 20, 21.

Такие же закономерности наблюдались Шевандиным и Маневичем [15], Павлушкиным [16], Писаренко, Руденко, Третьяченко и Трощенко [12].

§ 4. Прочность при изгибе

Для испытания на изгиб обычно применяются призматические стержни различной длины и площади поперечного сечения. Во избежание возможного скручивания образца желательно применять образцы с относительно высоким соотношением между длиной (l) и высотой (h) образца. Хорошие результаты можно ожидать при соотношении $l/h = 7 \div 10$.

Применение образцов с квадратным сечением несколько хуже, чем образцов, у которых отношение высоты к ширине (*b*) меньше единицы. Однако образцы с квадратным сечением устойчивее от возможного скручивания и не требуют большой длины.

В большинстве случаев испытания на изгиб производят сосредоточенной силой, приложенной к середине образца, лежащего на двух опорах (рис. 22, *а*). Такие испытания, рекомендуемые ГОСТ, следует считать неудачными, поскольку максимальный изгибающий момент

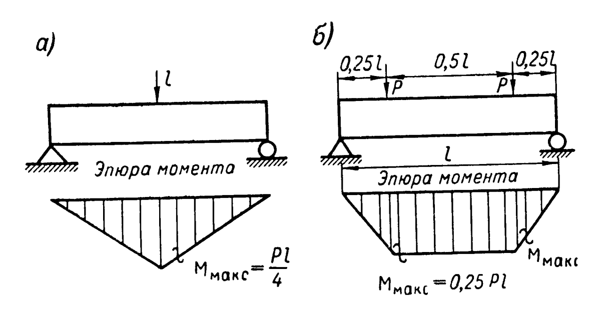


Рис. 22. Схема изгиба сосредоточенной силой стержня прямоугольного поперечного сечения (*а*) и схема чистого изгиба стержня прямоугольного сечения (*б*).

возникает в одном случайном сечении. Прочность в этом случае определяется качеством материала (наличие скопления пор, микротрещин и т. п.) в одном сечении. Поэтому неудивительно, что такие испытания дают больший разброс результатов.

Следует предпочесть испытания двумя равными, симметрично расположенными сосредоточенными силами, создающими на определенном участке длины образца «чистый изгиб» (рис. 22, *б*). При этом максимальные напряжения возникают на большем участке длины образца и прочность при изгибе определяется не случайным сечением, а «работой» значительного объема образца. Такие испытания в значительной степени уменьшают разброс результатов [12, 17].

Для предотвращения сжатия в опорах и под сосредоточенными силами следует производить испытания

с меньшими силами, т. е. устанавливать передачу нагрузки как можно дальше от опор, но при этом уменьшается участок чистого изгиба, определяющий прочность при изгибе.

Нами применялось расположение сосредоточенной силы P на $a = 0{,}25l$ от опоры. В этом случае $0{,}5l$ образца определяет его прочность. Прочность при изгибе ($\sigma_{из}$) определялась как отношение максимального изгибаю-

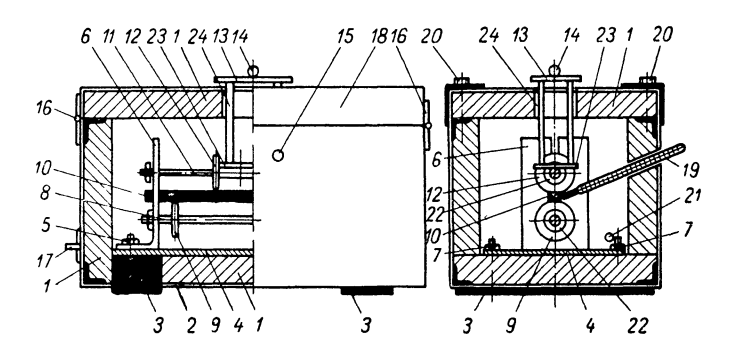


Рис. 23. Печь и устройство для испытания ферритов на изгиб при температурах —100÷+100° С.

щего момента ($M_{макс} = Pa$) к моменту сопротивления площади поперечного сечения $W = bh^2/6$, т. е.

$$\sigma_{из} = \frac{M_{макс}}{W} = \frac{6Pa}{bh^2} = 1{,}5\frac{Pl}{bh^2}. \qquad (6)$$

Для каждого материала проводились исследования на образцах длиной $l = 110$ *мм* и поперечным сечением 10×10 *мм*. Разброс результатов составлял $\pm 10\%$.

Испытания образцов для определения влияния температуры на прочность при изгибе проводились в специальных печах при температурах: $t = -100$, -50, $+20$, $+100°$ С. При каждой температуре испытывалось по 15 образцов.

Все испытания как при комнатной, так и при других значениях температуры, производились в специальной печи, схема которой представлена на рис. 23.

Поперечное сечение печи коробчатое. В качестве теплоизоляционного слоя *1* принята асбестоцементная крошка и асбестовый картон. Общая толщина изоляции

составляет 25 *мм*. На расстоянии 5 *мм* от внутренней поверхности теплоизоляционного слоя вдоль боковых поверхностей печи уложена спираль, соединенная с клеммами *17*, расположенными на торце печи. Печь закрывается сверху двумя крышками *15*, прикрепленными к корпусу печи петлями *16*. В крышках устроены отверстия для конструкции, передающей давление на образец.

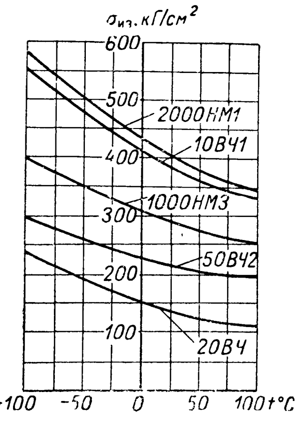


Рис. 24. Зависимость прочности магнитномягких ферритов при изгибе от температуры.

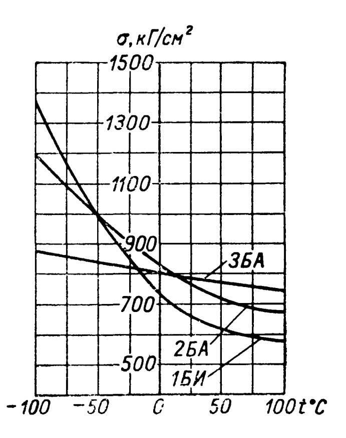


Рис. 25. Зависимость прочности при изгибе магнитножестких ферритов от температуры.

Внутри печи расположены асбестоцементные пластины *2*, соединенные болтами с текстолитовыми пластинами *3*. Болты *7* служат для крепления металлической пластины *4* к корпусу печи. К этой же пластине прикреплены болтами *4* стойки *5*. Образец *10* устанавливается на опоры из текстолитовых пластин *9*, закрепленных на подшипниках *22*, расстояние между которыми может изменяться. Последние насажены на ось *8*, которая прикреплена гайками к стойкам *6*. Свободное перемещение на оси *11* обеспечивается устройством в стойках паза. На этой оси устанавливается конструкция, передающая давление на образец. К оси *11* на ее части между пластинами *12*, расстояние между которыми может изменяться, укрепляется металлическая пластина *23*, соединенная стойками *24* с металлической

пластиной *13*. Нагрузка прикладывается к центрирующему шарику *14* и затем передается на образец. Плотное прилегание крышки *15* к корпусу печи обеспечивается болтами *20*. Температура внутри печи измеряется термометром *19*, вводимым в отверстие *18* боковой поверхности печи. Отверстие *21* в торце печи служит для подачи жидкого азота. При испытаниях на

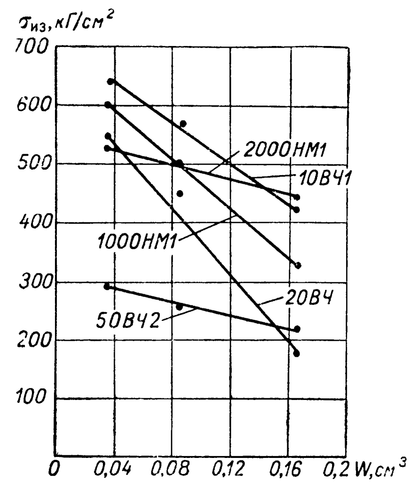


Рис. 26. Зависимость прочности при изгибе магнитномягких ферритов от момента сопротивления поперечного сечения.

Рис. 27. Зависимость прочности при изгибе магнитножестких ферритов от момента сопротивления поперечного сечения.

изгиб в условиях отрицательных температур теплоизоляционный слой *1* заменяется ватой.

Результаты зависимости прочности при изгибе магнитномягких и магнитножестких ферритов от температуры показаны на рис. 24, 25. Как видно из графиков, прочность ферритов при изгибе с ростом температуры снижается.

Влияние масштабно-технологического фактора исследовалось на призматических образцах размеров в *мм*: $l \times b \times h = 100 \times 10 \times 10$; $80 \times 8 \times 8$; $60 \times 6 \times 6$.

По результатам испытаний были построены кривые зависимости напряжения $\sigma_{из}$ от момента сопротивления W (рис. 26, 27).

Приведенные в табл. 5 данные зависимости среднего предела прочности при изгибе образцов ферритов от

Таблица 5

Зависимости прочности при изгибе ($\sigma_{из}$, $кГ/см^2$) от масштабно-технологического фактора

Марка феррита	Момент сопротивления, $см^3$		
	$W = 0{,}166$	$W = 0{,}085$	$W = 0{,}037$
10ВЧ1	425	560	640
20ВЧ	180	410	550
50ВЧ2	220	260	290
1000ННЗ	220	260	290
2000НМ1	220	260	290
1БИ	660	686	718
2БА	725	764	797
3БА	780	800	845

момента сопротивления поперечного сечения показывают, как и при испытаниях на растяжение и сжатие, что наименьшую прочность имеют образцы ферритов 20ВЧ, 50ВЧ2 с наибольшей пористостью.

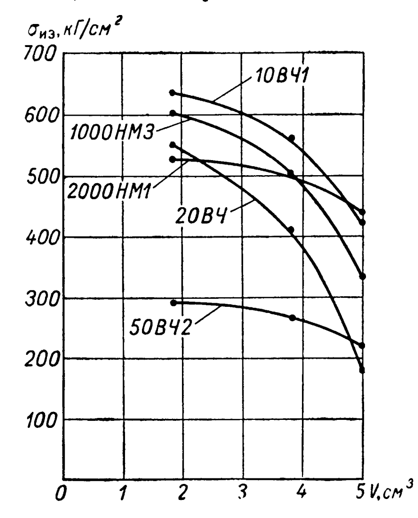


Рис. 28. Зависимость прочности при изгибе от объема образца между опорами.

При уменьшении момента сопротивления в 4,6 раза значение среднего предела прочности ферритов повышается на 5—10% для магнитножестких ферритов и несколько больше для магнитномягких ферритов.

Исследование влияния объема рабочей части образца между опорами на величину прочности (рис. 28) показало, что с увеличением объема рабочей части образца прочность его значительно снижается. Это объяс-

няется увеличением возможности появления «слабых мест», о чем говорилось в § 3, и одновременно эти результаты показывают нецелесообразность применения схемы с одной сосредоточенной силой для испытания на изгиб хрупких пористых материалов.

Для исследования влияния на прочность одновременного воздействия температуры и размера образца были проведены испытания на 5 марках магнитномягких ферритов. Учитывая, что в литературе данный вопрос в применении к хрупким материалам мало отражен, работа проводилась при трех температурах, на трех типоразмерах образцов для всех 5 марок ферритов.

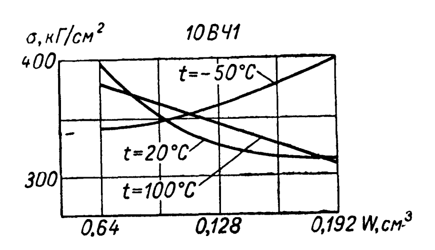


Рис. 29. Зависимость прочности от момента сопротивления поперечного сечения при различных температурах феррита 10ВЧ1.

Использовались призматические образцы следующих размеров в *мм*: $b \times h \times l = 10 \times 10 \times 100$; $8 \times 10 \times 80$; $6 \times 10 \times 60$.

Была выбрана четырехточечная схема (схема «чистого изгиба»), причем отношение длины пролета к расстоянию между силами было принято равным 2. Образец устанавливался свободно на две опоры. Нагрузка подавалась двумя сосредоточенными силами. Прочность при изгибе определялась по формуле сопротивления материалов:

$$\sigma_{из} = \frac{3Pl}{2bh^2}.$$

Все испытания проводились в специальной печи при температурах: $t = -50, +20, +100°$ С.

Испытание образцов ферритов 10ВЧ1 (рис. 29) дает возможность установить:

1. При температуре $t = 20°$ С прочность при изгибе увеличивается с уменьшением поперечного сечения образцов в 1,3 раза.

2. При температуре $t = 100°$ С среднее вероятное значение предела прочности для образцов размером $10 \times 10 \times 100$ *мм* и $6 \times 10 \times 60$ *мм* уменьшается по

сравнению со значениями, полученными при температуре $t=20^\circ$ С, а для образцов размера $8\times10\times80$ *мм* возрастает.

3. При температуре $t=-50^\circ$ С с уменьшением поперечного сечения образца прочность понижается, что явилось новым интересным фактом, требующим дальнейших исследований и проверки на большем количестве образцов.



Рис. 30. Микроструктура феррита 10ВЧ1 (образец № 9 12000*).

Необходимо отметить, что микроструктура образца № 9 размером $10\times10\times100$ *мм,* испытанного при температуре $t=20^\circ$С и разрушившегося при напряжении 281 $кГ/см^2$ (рис. 30) значительно отличается от микроструктуры образца № 12 этой же партии, разрушившегося при напряжении 372 $кГ/см^2$ (рис. 31). Снимки микрошлифов получены на электронном микроскопе с увеличением 12000*. Анализ показывает, что материалы даже одной партии и одного обжига часто имеют различные величины зерен в структуре и различны по плотности.

Испытания на изгиб образцов ферритов 1000НМ3 и 2000НМ1 (рис. 32) дают несколько иную картину зависимостей:

1. Повышение прочности образцов каждого типоразмера при изменении температуры от $t=100$ до $t=-50^\circ$ С. Но важно подчеркнуть, что при уменьшении размеров поперечного сечения влияние температуры на прочность при изгибе уменьшается.

2. Понижение прочности при температуре $t=-50^\circ$ С с уменьшением размеров поперечного сечения также не может быть объяснено с точки зрения масштабного эффекта.

Выдвинутая впервые Александровым и Журковым [18] и получившая математическое оформление в рабо-

тах Вейбулла [19], Конторовой и Френкеля [20], Афанасьева [21] и Волкова [22] статистическая теория проч-



Рис. 31. Микроструктура феррита 10ВЧ1 (образец № 12 12000*).

ности объясняет влияние размеров на прочность присутствием в теле случайных неоднородностей, из которых самая слабая определяет прочность, и вероятность существования которой неодинакова для тел разных размеров. Но эта теория хорошо подтверждается опытами для материалов, характер структуры которых не изменяется с изменением размеров образца.

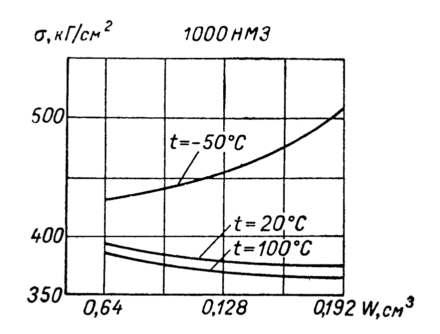


Рис. 32. Зависимость прочности от момента сопротивления поперечного сечения при различных температурах ферритов 1000НМ3.

Для таких же материалов, как ферриты, эта теория не может дать надежных результатов, так как структура ферритов зависит от толщины образца при одних и тех же технологических условиях (рис. 33, 34, 35).

Наиболее приемлемой является технологическая теория, объясняющая различие в прочности неодинаковыми

условиями обработки. Эта теория была впервые выдвинута в работе Одинга [23] и на ее важное значение при выяснении вопроса о влиянии размеров образца из хрупкого материала на механические свойства указывалось в работе Черткова [24].

На рис. 33, 34, 35 показаны снимки микрошлифов поверхности образцов одного и того же материала феррита 1000НМ3 размерами соответственно 8×10×80 *мм*,

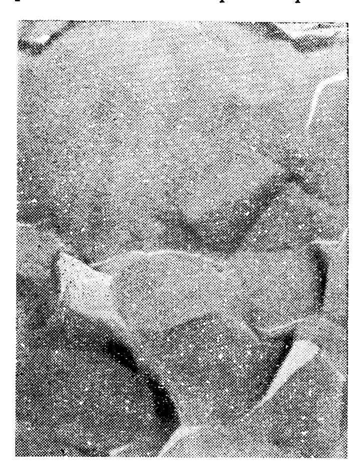


Рис. 33. Микроструктура феррита 1000НМ3 (образец 6×10×60 *мм* 6000 *).



Рис. 34. Микроструктура феррита 1000НМ3 (образец 8×10×80 *мм* 6000 *).

10×10×100 *мм* и 6×10×60 *мм*, испытанных при температуре $t=20°$ С. Эти снимки микрошлифов подтверждают технологическую теорию. Наибольшей прочностью обладают образцы с размерами сечения 6×10 *мм*, имеющие меньшую величину зерен. Но и эта теория не может, конечно, объяснить факта понижения прочности с уменьшением размеров поперечного сечения образца при температуре $t=-50°$ С. Если бы прочность ферритов при изгибе определялась только упругой деформацией крайнего растягивающего слоя, то характер изменения прочности при различных температурах сохранился бы.

Хрупкие материалы при изгибе разрушаются с поверхности, где образуются наиболее опасные дефекты и напряжение максимальное. Прочность в этом случае

не должна зависеть от толщины образца, если физическое состояние поверхности образцов одинаковое.

Но как видно из рис. 33, 34, 35, бóльшим размерам сечения соответствует большая величина зерен, что приводит к большей вероятности появления на поверхности концентраторов напряжения и к уменьшению прочности при температурах $t=20$ и $t=100°$ C. Вероятно, с понижением температуры определяющим фактором являются микротрещины, развитие которых облегчается в меньшем объеме, что вызывает понижение прочности с уменьшением размеров сечения.



Рис. 35. Микроструктура феррита 1000НМ3 (образец $10\times\times10\times100$ *мм* 6000 *).

Технологической теорией можно объяснить и тот факт, что прочность образцов из ферритов уменьшалась приблизительно в 2 раза в случае, когда нагрузка к образцам с размерами $6\times10\times\times60$ *мм* прикладывалась не вдоль короткой стороны сечения, а вдоль длинной стороны. Статистическая теория прочности не дает ответа на этот вопрос.

Необходимо отметить, что исследование влияния на прочность масштабно-технологического фактора при одновременном изменении температуры испытаний проводилось, очевидно, впервые. Полученные результаты должны быть уточнены в дальнейшей работе. Что же касается теории масштабно-технологического фактора, то она, нужно согласиться с автором работы [24], должна быть создана для каждого материала, в том числе и для ферритов, как материалов хрупких, пористых и обладающих специфическими свойствами.

§ 5. Упругие постоянные

Под модулями упругости принято считать величины, характеризующие упругие свойства материала. Физический смысл модулей выявляется при рассмотрении

основных элементарных типов напряженного состояния упругого тела: одностороннего нормального напряжения и чистого сдвига. Для каждого из этих напряженных состояний зависимость между напряжением и соответствующей ему деформацией определяется простейшей формулой: напряжение равно произведению соответствующей деформации на модуль упругости.

Одностороннему нормальному напряжению σ, возникающему при простом растяжении (сжатии), соответствует в направлении растяжения модуль продольной упругости E (модуль Юнга). Модуль Юнга равен отношению нормального напряжения к относительному удлинению ε, вызванному этим напряжением в направлении его действия

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}, \tag{7}$$

и характеризует способность материала сопротивляться деформации растяжения. Напряженному состоянию чистого сдвига, при котором по двум взаимно ортогональным площадкам действуют только касательные напряжения τ, соответствует модуль сдвига G. По величине он равен отношению касательного напряжения τ к величине угла сдвига γ, определяющему искажение прямого угла между плоскостями, по которым действуют касательные напряжения

$$G = \frac{\tau}{\gamma}, \tag{8}$$

и определяет способность материала сопротивляться изменению формы при сохранении его объема.

К постоянным величинам, характеризующим упругие свойства материалов, относится коэффициент Пуассона Величина его равна отношению абсолютного значения относительного поперечного сжатия ε_1 (при одностороннем растяжении) к относительному продольному удлинению ε, т. е.

$$\nu = \frac{|\varepsilon_1|}{\varepsilon}. \tag{9}$$

Для однородного изотропного тела, к которому могут быть отнесены и ферриты, модули упругости и коэффициент Пуассона одинаковы по всем направлениям.

Три величины E, G и ν связаны соотношением:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}. \quad (10)$$

Следовательно, только две из них являются независимыми величинами, и упругие свойства изотропного тела определяются двумя упругими постоянными.

Для определения характеристик упругости используются как статические, так и динамические методы.

А. Статический метод

При определении модуля нормальной упругости задача сводится к измерению деформации при одноосном растяжении стержня данного материала, исходя из формулы, выражающей закон Гука:

$$E = \frac{\Delta P l}{F \Delta l}, \quad (11)$$

где ΔP — изменение нагрузки, *кГ*; l — длина базы (замеряемой части образца), *см*; Δl — абсолютное удлинение образца от действия нагрузки, *см*.

Существует много способов измерения деформации: при помощи оптических тензометров, рычажных тензометров, проволочных электротензометров и т. д. Однако для обеспечения высокой точности получаемых результатов требуется очень высокая чувствительность этих приборов. Учитывая большую хрупкость ферритов, а также малые деформации образцов, трудности, связанные с технологией изготовления образцов достаточной длины, можно считать статический метод определения модуля нормальной упругости для ферритов мало применимым.

При определении модуля сдвига статическим методом задача сводится к определению угла закручивания γ под действием крутящего момента $M_{кр}$. При этом модуль сдвига определяется из зависимости, включающей γ, т. е.

$$G = \frac{\Delta M_{кр} l_{расч}}{\Delta \gamma_{ср} J_p}, \quad (12)$$

где $\Delta M_{кр}$ — изменение крутящего момента, *кГсм*; $l_{расч}$ — расчетный участок длины образца, на котором

измеряется угол закручивания, *см*; $\Delta\gamma$ — угол закручивания, соответствующий изменению крутящего момента на $\Delta M_{кр}$, *рад*; $J_р$ — полярный момент инерции равен $\pi d^4/32$ для круглых образцов, *см*.

Угол поворота (закручивания) γ можно измерить при помощи зеркального прибора Мартенса или при помощи тензодатчиков. Однако по вышеуказанным причинам для определения модуля сдвига ферритов все указанные способы оказались мало пригодными. Следует отметить, что статический метод определения упругих постоянных очень трудоемкий, требующий весьма точной установки как образцов, так и приборов, что не всегда удается, особенно при испытаниях больших партий образцов.

Определение коэффициента Пуассона статическим способом проводилось при помощи проволочных электротензометров. Проволочный тензометр омического сопротивления — это решетка тонкой проволоки, наклеенная на полоску тонкой бумаги. В настоящее время промышленностью выпускаются проволочные тензодатчики на бумажной основе ПБ с базой от 5 до 30 *мм* и сопротивлением от 50 до 400 *ом*; проволочные датчики на пленочной основе ПП с базой от 10 до 30 *мм* и сопротивлением от 50 до 300 *ом* и фольговые датчики сопротивления из константановой фольги ФК с базой от 5 до 20 *мм* и сопротивлением от 50 до 200 *ом*.

В процессе исследования датчик наклеивается на поверхность испытываемого образца и деформируется вместе с ней. Сопротивление проволочки (фольги) при этом изменяется, так как изменяется длина проволочки, ее поперечное сечение и удельное сопротивление [25, 26].

Как показали экспериментальные данные, между относительной деформацией проволочной решетки ε и относительным изменением омического сопротивления $\Delta R/R$ существует линейная зависимость:

$$\frac{\Delta R}{R} = \kappa_т \varepsilon, \qquad (13)$$

где $\kappa_т$ — коэффициент тензочувствительности датчика. На его величину влияют различные факторы: материал проволочки и основы, свойства клея и т. д.

Обычно у проволочных тензодатчиков коэффициент тензочувствительности составляет $\kappa_т = 1{,}8 \div 2{,}0$, в то

время как у полупроводниковых датчиков он равен $60 \div 100$.

Проволочные датчики включаются в измерительную цепь по схеме одинарного моста или реже по потенциометрической схеме. При использовании схемы моста измерения могут производиться либо нулевым методом,

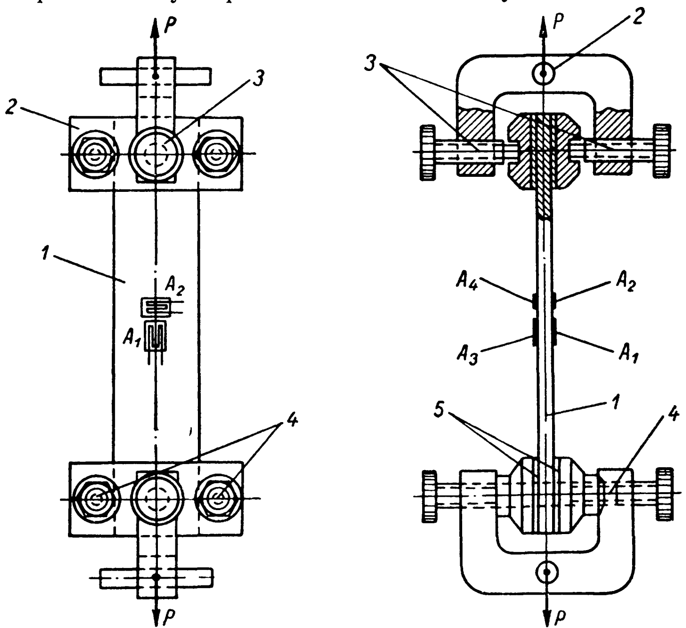


Рис. 36. Схема определения коэффициента Пуассона на ферритовом образце проволочными тензодатчиками.

когда результаты измерений фиксируются при сбалансированном состоянии моста, либо методом непосредственных отсчетов, когда применяется неравновесный мост.

При статических испытаниях применяется равновесный мост, дающий большую точность измерений. Для компенсации температурной погрешности в соседнее плечо моста включают неработающий, компенсационный датчик, аналогичный рабочему. В настоящее время существует большое число всевозможных тензостанций для исследования деформаций в статическом и динамическом режимах.

Определение коэффициента Пуассона магнитножестких бариевых ферритов 1БИ, 2БА, 3БА, в частности, проводилось на тензостанциях, разработанных в ЛЭТИ и позволяющих измерять деформацию $\varepsilon=1\cdot10^{-6}$. На рис. 36 показана схема крепления образца пластины феррита размером 220×40×10 *мм* с наклеенными тензодатчиками при растяжении ее на испытательной машине.

Пластина феррита *1* с наклеенными на нее проволочными тензодатчиками A_1, A_2, A_3, A_4 сжимается текстолитовыми захватами *5*, при помощи винтов *4*. Текстолитовые захваты соединяются с металлическими вилками винтами *3*, а металлические вилки, в свою очередь, посредством осей *2* присоединяются к захватам испытательной машины. Причем датчики A_1, A_3 служат для измерения продольной деформации, а датчики A_3, A_4 — для измерения поперечной деформации. Датчики наклеивались с противоположных сторон образца с целью устранения влияния напряжений изгиба.

Коэффициент Пуассона ν определяется как отношение средней величины показаний поперечных датчиков $\frac{\Delta A_2+\Delta A_4}{2}$ к средней величине показаний датчиков продольной деформации $\frac{\Delta A_1+\Delta A_3}{2}$, т. е.

$$\nu=\frac{\Delta A_2+\Delta A_4}{\Delta A_1+\Delta A_3} \quad (14)$$

при изменении напряжения на $\Delta\sigma_p=20$ *кГ/см²*. Полученные данные с точностью до ±10% соответствовали результатам определения коэффициента Пуассона динамическим методом.

Б. Динамический метод

1. Определение модуля нормальной упругости

а. *По частоте собственных колебаний*

Из теории колебаний известно, что между частотой собственных колебаний упругого тела и модулем нормальной упругости существует зависимость [27]. Резонансная частота первой гармоники для случая продоль-

ных колебаний однородного изотропного стержня, длина которого больше любой стороны поперечного сечения в 7—8 раз, с достаточной степенью точности описывается уравнением:

$$f_{\text{пр}} = \frac{1}{2l}\sqrt{\frac{Eg}{\gamma}}, \qquad (15)$$

где $f_{\text{пр}}$ — резонансная частота продольных колебаний, *гц*; l — длина образца, *см*; E — модуль нормальной упругости, *кГ/см*^{2}; g — ускорение силы тяжести, *см/сек*^{2}; γ — вес единицы объема, *кГ/см*^{3}.

Если взять l в *см*, вес образца $Q=\gamma Fl$ в *кГ*, резонансную частоту в *гц*, то модуль нормальной упругости (модуль Юнга), выраженный в *кГ/см*^{2}, определится из следующего выражения для образцов с прямоугольным поперечным сечением:

$$E = 4079 \cdot 10^{-6}\frac{Q}{F} l f_{\text{пр}}^2, \qquad (16)$$

где F — площадь поперечного сечения образца, *см*^{2}; а для образцов круглого сечения:

$$E = 5180 \cdot 10^{-6}\frac{Q}{d^2} l f_{\text{пр}}^2, \qquad (17)$$

где d — диаметр образца.

Модуль нормальной упругости можно определять и по резонансной частоте изгибных колебаний, но уравнение для вычисления частот изгибных колебаний не учитывает сдвига сечений, обусловленного наличием перерезывающей силы, инерции вращения сечений и отношения размеров поперечного сечения к длине стержня.

В результате в формулу, определяющую модуль нормальной упругости по изгибным колебаниям, приходится вводить поправочный коэффициент κ, что не требуется при продольных колебаниях.

Для случая поперечных (изгибных) колебаний призматического стержня на двух опорах со свободно свешивающимися концами, указанная зависимость выразится уравнением

$$f_{\text{из}} = \frac{m^2}{2\pi l^2}\sqrt{\frac{EJ_y g}{F\gamma}}, \qquad (18)$$

где $f_{из}$ — частота собственных изгибных колебаний стержня, *гц*; $m=4{,}73$ — коэффициент для первой гармоники поперечных колебаний стержня на двух опорах с двумя консолями; J_y — момент инерции сечения стержня относительно оси, перпендикулярной изгибу при колебаниях, причем:

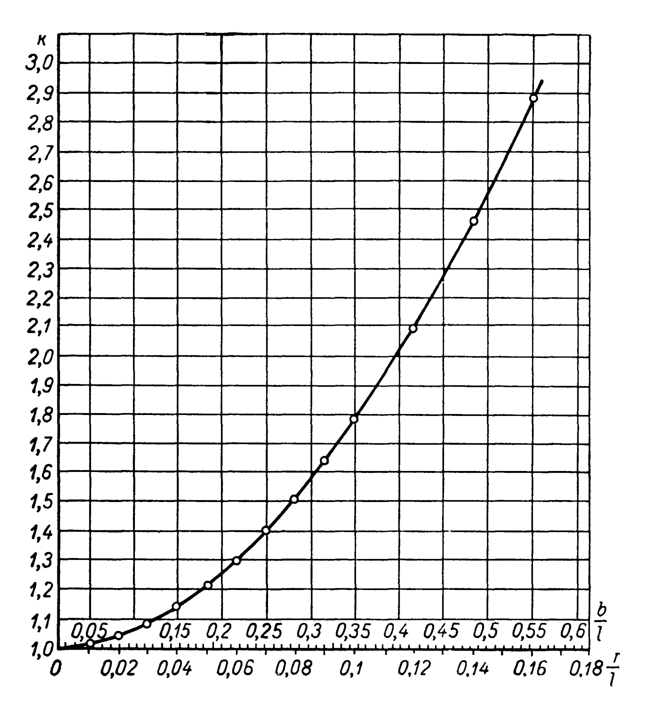


Рис. 37. Значения коэффициента *к* в зависимости от размеров образца.

для прямоугольного сечения со сторонами b и h

$$J_y = \frac{bh^3}{12}, \qquad (19)$$

для круглого образца диаметром d

$$J_y = \frac{\pi d^4}{64}. \qquad (20)$$

Принимая прежними остальные обозначения l, E, F, γ, а вес стержня $Q=\gamma Fl$, и решая уравнение относи-

тельно E, получим

$$E = \frac{4\pi^2 l^3}{m^4 J_y g} \cdot f_{\text{из}}^2 \cdot Q. \qquad (21)$$

Подставляя в уравнение постоянные величины и введя поправочный коэффициент κ, получаем расчетную формулу для образцов любой формы поперечного сечения (прямоугольного или круглого):

$$E = 80{,}5 \cdot 10^{-6} \frac{l^3}{J_y} \cdot Q \cdot f_{\text{из}}^2 \cdot \kappa. \qquad (22)$$

Коэффициент κ определяется из графика (рис. 37). По оси абсцисс графика отложены отношения b/l и r/l, где b — длина стороны прямоугольного образца в направлении колебаний; r — радиус инерции поперечного сечения образца.

Для круглого образца

$$r = \sqrt{\frac{J_y}{F}} = \frac{d}{4}. \qquad (23)$$

Для прямоугольного образца

$$r = \frac{b}{3{,}46}. \qquad (23а)$$

б. *По скорости распространения ультразвука*

Основой метода является измерение скорости распространения ультразвуковых импульсов продольных и поперечных волн в исследуемом материале. Скорость распространения ультразвука в среде определяется по формуле

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}}, \qquad (24)$$

где v — скорость распространения ультразвуковых волн в данном материале, *м/сек*; E — модуль нормальной упругости, *кГ/см*^{2}; ρ — плотность материала, *г/см*^{3}; ν — коэффициент Пуассона.

Решая уравнение (24) относительно E, получим

$$E = \frac{v^2 \rho (1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)\, 98{,}1}. \qquad (25)$$

2. Определение модуля сдвига

а. *По частоте собственных колебаний*

Зависимость между модулем сдвига (G) и резонансной частотой крутильных колебаний ($f_{кр}$) выражается уравнением

$$f_{кр} = \frac{1}{2l}\sqrt{\frac{Gg}{\gamma}}. \qquad (26)$$

Решая уравнение относительно G, получим

$$G = 4079 \cdot 10^{-6}\frac{Q}{F} \cdot l \cdot f_{кр}^2 \cdot \kappa_ф, \qquad (27)$$

где $\kappa_ф$ — коэффициент, учитывающий форму сечения образца.

Для прямоугольного сечения коэффициент κ определяется по формуле

$$\kappa_ф = \frac{\frac{b}{h} + \frac{h}{b}}{4\frac{b}{h} + 0{,}21\left(\frac{b}{h}\right)^6 - 2{,}52\left(\frac{b}{h}\right)^2}, \qquad (28)$$

где b — длина короткой стороны образца; h — длина другой стороны.

Для образцов с круглым поперечным сечением $\kappa = 1$. Для образцов с квадратным поперечным сечением $\kappa = 1{,}183$.

б. *По скорости распространения ультразвуковых волн*

Скорость распространения ультразвуковых импульсов поперечных волн находится из уравнения

$$v_n = \sqrt{\frac{G}{\rho}}. \qquad (29)$$

Решая это уравнение относительно G, находим

$$G = v_n \gamma \frac{1}{98{,}1}, \qquad (30)$$

где v_n — скорость распространения поперечных волн, *м/сек*; γ — удельный вес, *Г/см*^{3}.

3. Определение коэффициента Пуассона

а. При определении упругих постоянных по частоте собственных колебаний коэффициент Пуассона вычисляется как и при статическом методе по известной формуле

$$\nu = \frac{E}{2G} - 1, \tag{31}$$

т. е. через другие упругие постоянные.

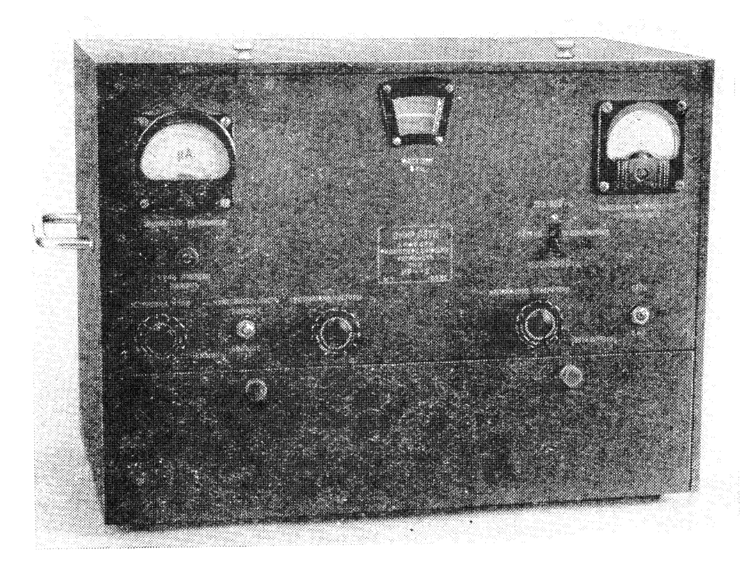


Рис. 38. Общий вид модулемера ИРЧ-2.

б. При определении упругих постоянных по скорости распространения ультразвука в материале значение коэффициента Пуассона находится из выражения

$$\nu = \frac{v^2 - 2v_n^2}{2\left(v^2 - v_n^2\right)}, \tag{32}$$

где v — скорость распространения продольных волн, *м/сек*; v_n — скорость распространения поперечных волн, *м/сек*.

Для определения упругих постоянных по резонансной частоте колебаний может быть разработано несколько схем.

Одной из таких схем явилось создание в 1953 г. лабораторией радиопередающих устройств ЛЭТИ прибора—модулемера ИРЧ-2 (измеритель резонансных частот). Прибор предназначен для измерения в лабораторных условиях частоты собственных колебаний образцов твердых тел в диапазоне 250÷10 000 *гц* (рис. 38). В следующей модели прибора ИЧМК-2 диапазон был расширен до 12 000 *гц* (рис. 39).

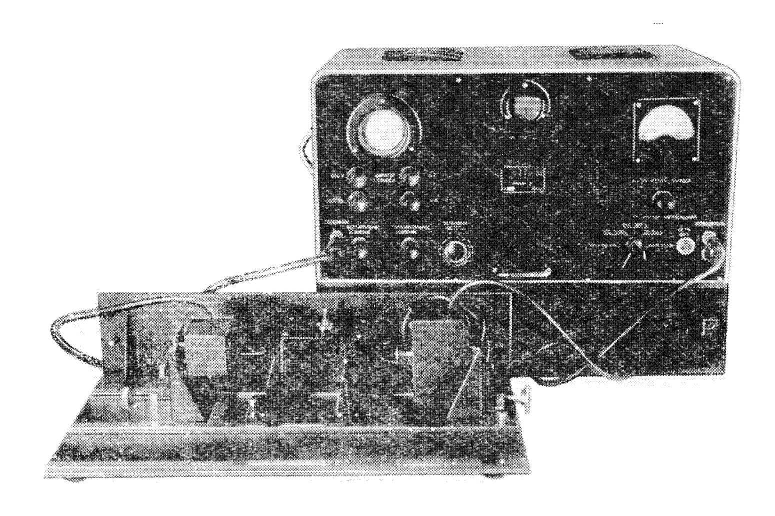


Рис. 39. Общий вид модулемера ИЧМК-2.

На рис. 40 представлена блок-схема модулемера, из которой ясен принцип работы прибора. Испытуемый образец помещается на двух опорах, расположенных на расстоянии $0{,}224l$ от его торцов, где l — полная длина образца. Механические колебания в образце создаются возбудителем *2*, который питается от генератора звуковой частоты *1* и преобразует электрические колебания в механические.

Для возбуждения в образце продольных, изгибных или крутильных колебаний используется электродинамический громкоговоритель с обрезанным диффузором, к звуковой катушке которого прикреплен тонкий металлический штырь для соприкосновения с поверхностью

образца. При изменении частоты генератора изменяется частота колебаний штыря возбудителя, находящегося в соприкосновении с образцом, и, следовательно, изменяется частота колебаний самого образца. В момент совпадения собственной частоты колебаний образца с частотой звукового генератора наступает явление резонанса, при котором амплитуда механических колебаний достигает наибольшей величины. Механические ко-

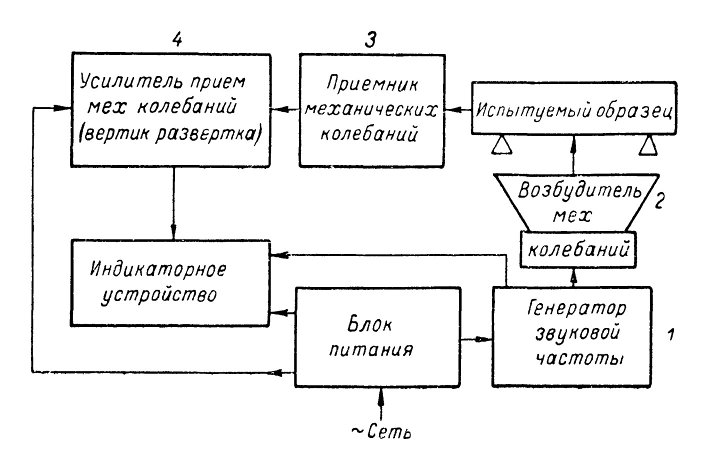


Рис. 40. Блок-схема модулемера.

лебания образца воспринимаются острием иглы приемника *3*, который преобразует их в электрические колебания.

Напряжение электрических колебаний приемника подается на вход усилителя *4*. После усиления оно подается на пластину вертикальной развертки электроннолучевой трубки, являющейся индикатором резонанса. В момент резонанса величина развертки луча на экране трубки будет наибольшей. В этот момент по шкале генератора фиксируется частота, совпадающая по величине с частотой собственных колебаний образца.

Колебания основной частоты в образце могут возникать не только при возбуждении его частотой, равной собственной, но и при возбуждении частотами в 2, 3 и т. д. раз меньшими. Чтобы точно определить собственную частоту колебаний образца в модулемере, приме-

ним метод сравнения частот по фигурам Лиссажу. Этот метод заключается в том, что если подавать на каждую пару пластин электроннолучевой трубки синусоидальные напряжения, то в зависимости от соотношения частот и фаз напряжения на экране трубки могут быть получены фигуры, показанные на рис. 41, *а*, *б*, *в*. Частоте собственных колебаний образца первого тона соответствуют фигуры Лиссажу, показанные на рис. 41, *а*.

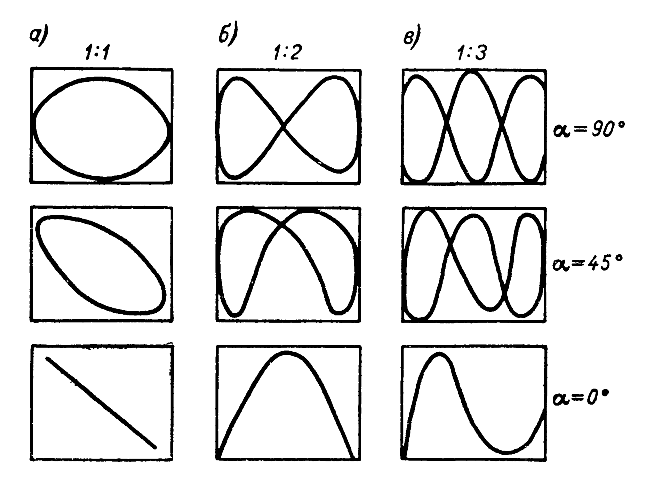


Рис. 41. Фигуры Лиссажу.

Для возбуждения продольных и крутильных колебаний в образце имеются две особые головки-возбудители, помещаемые на испытательной панели со стороны правого торца образца. Виды колебаний образцов показаны на рис. 42. При измерении поперечных колебаний приемник колебаний *3* помещается на испытательной панели с боковой стороны образца у левого края (см. рис. 39).

Измерение собственной частоты колебаний можно производить на образцах круглого сечения диаметром от 10 до 50 *мм*, квадратного сечения со сторонами от 10×10 *мм* до 100×100 *мм*, прямоугольного сечения — со сторонами от 20 до 100 *мм*. Длина испытуемых образцов может быть от 100 до 500 *мм*, но обязательно в 4—5 раз больше наибольшей стороны поперечного се-

чения. Вычисление модуля упругости и модуля сдвига тем точнее, чем больше отношение длины к диаметру или к боковой стороне прямоугольника.

Общие данные прибора ИЧМК:

1. Диапазон измеряемых частот 250 ÷ 12 000 *гц*.

2. Погрешность измерения частот ±2%.

3. Погрешность измерения модулей 4 ÷ 7%.

4. Питание от сети переменного тока 110, 127, 220 *в* с частотой 50 *гц*.

5. Мощность, потребляемая прибором от сети переменного тока, около 100 *вт*.

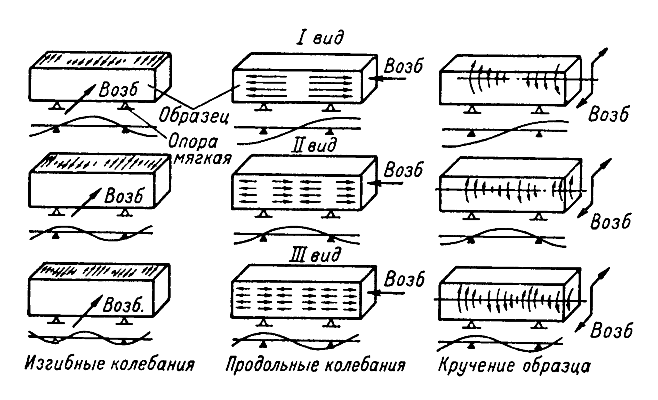


Рис. 42. Виды колебаний образца.

К несомненным достоинствам прибора необходимо отнести сравнительную быстроту измерений модулей; возможность определения всех упругих постоянных на одном образце без разрушения; достаточную точность результатов измерения; возможность определения упругих постоянных на образцах, предназначенных для других видов испытаний, например, для прочности при изгибе или для определения ударной прочности.

К недостаткам прибора можно отнести ограниченный диапазон колебаний (12 000 *гц*), что не всегда удовлетворяет исследователя, особенно когда испытания необходимо провести на образцах меньших размеров, т. е. при частотах свыше 12 *кгц*.

Определение упругих постоянных на более высоких (до 30 *кгц*) частотах, а также определение упругих

постоянных на образцах в виде колец было проделано Дуровкиным [28]. В указанной (см. рис. 40) блок-схеме модулемера были произведены некоторые изменения, а именно:

— вместо электродинамического громкоговорителя был использован пьезоэлектрический звукосниматель и динамик высокой частоты;

— вместо звукового генератора применен генератор стандартных сигналов Г-3-7А;

— выход со звукоснимателя подавался непосредственно на вертикальные пластины осциллографа типа ЭО-7, на горизонтальные же пластины подавался сигнал с генератора;

— были усовершенствованы приспособления для крепления образцов.

Все это позволило улучшить чувствительность установки, испытывать более мелкие образцы, например кольца с внешним диаметром ∅ 25 *мм*, а также ускорило проведение испытаний. При подготовленной, настроенной и опробованной установке можно испытывать по нескольку десятков образцов в смену.

Таблица 6

Наиболее вероятные значения упругих постоянных бариевых ферритов и возможные отклонения результатов

Упругие постоянные	Отклонение результатов	Марки феррита и удельный вес, *Г/см*³					
		1БИ		2БА		3БА	
		4,41	4,70	4,70	4,90	4,80	5,01
$E \times 10^{-5}$, *кГ/см*²	минимальное	10,5	11,6	16,1	18,7	18,0	20,7
	среднее	11,0	15,1	16,4	19,0	18,4	21,1
	максимальное	11,5	15,6	16,7	19,3	18,8	21,5
$G \times 10^{-5}$, *кГ/см*²	минимальное	4,3	5,7	5,9	6,7	6,4	7,2
	среднее	4,5	5,9	6,1	6,9	6,6	7,4
	максимальное	4,7	6,1	6,3	7,1	6,8	7,6
ν	минимальное	0,21	0,23	0,30	0,30	0,31	0,37
	среднее	0,24	0,26	0,34	0,34	0,35	0,40
	максимальное	0,27	0,29	0,38	0,38	0,40	0,42

В результате проведенных испытаний [28] было установлено, что модуль нормальной упругости магнитномягких и магнитножестких бариевых ферритов в значительной степени зависит от пористости материала или от его удельного веса в пределах одной марки. Эти данные сведены в табл. 6.

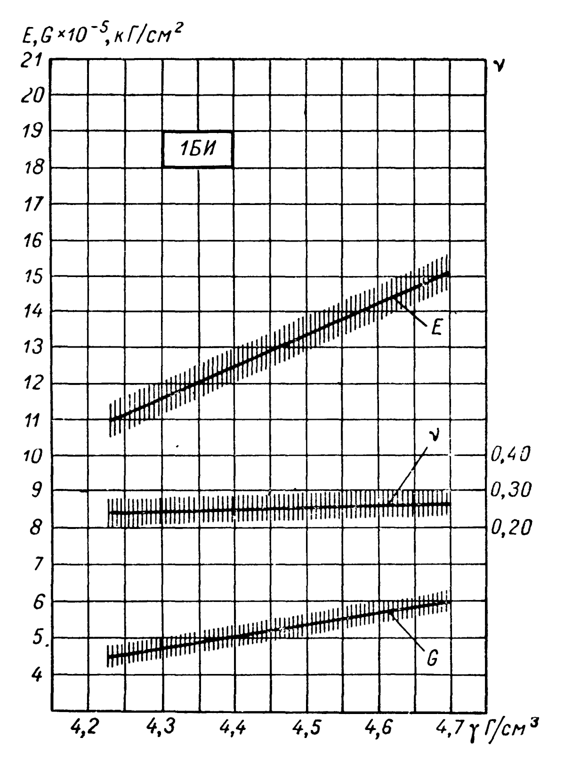


Рис. 43. Зависимость упругих постоянных феррита 1БИ от удельного веса.

На рис. 43, 43а, 43б приведены результаты определения модуля нормальной упругости, модуля сдвига и коэффициента Пуассона в зависимости от удельного веса для магнитножестких ферритов марок 1БИ, 2БА, 3БА.

Как видно из графиков, зависимость получена линейная, что вполне соответствует (при небольшом

изменении пористости) данным Кингери [29]. Смит и Вейн [2] дают зависимость модуля нормальной упругости от пористости в виде пологой кривой, небольшой участок которой с достаточной степенью точности можно аппроксимировать.

Определение упругих постоянных по скорости распространения в образцах ультразвуковых импульсов продольных или поперечных колебаний производится обычно на приборах типа УЗИС (ультразвуковой измеритель скорости).

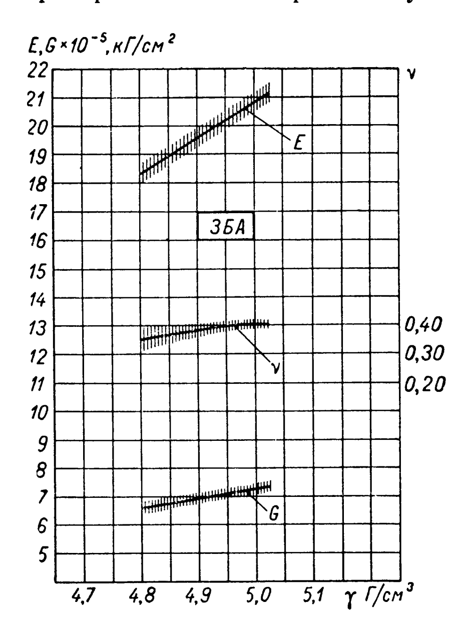


Рис. 43а. Зависимость упругих постоянных феррита 2БА от удельного веса.

На рис. 44 показан общий вид одного из таких приборов — УЗИС-ЛЭТИ образца 1967 г. Прибор состоит из измерительной линии ИЛ *3*, в которую закладывается испытуемый образец, эталонной линии ЭЛ *2* и электронного устройства *1*, формирующего короткий импульс напряжения для возбуждения кварцевых пластин измерительной и эталонной линий, с синхронным осциллоскопом, позволяющим сравнивать малые промежутки времени прохождения ультразвука в образце и в эталонной жидкости.

На измерительной линии крепятся датчики продольных колебаний *4* или поперечных колебаний *5*, между которыми устанавливаются на акустический контакт образцы. Датчики измерительной линии и эталонная линия подключаются к электронному устройству соединительными кабелями *6*. Электронное устройство подсоединяется к сети переменного тока шлангом питания прибора *7* через разъем питания *11*. На задней стенке

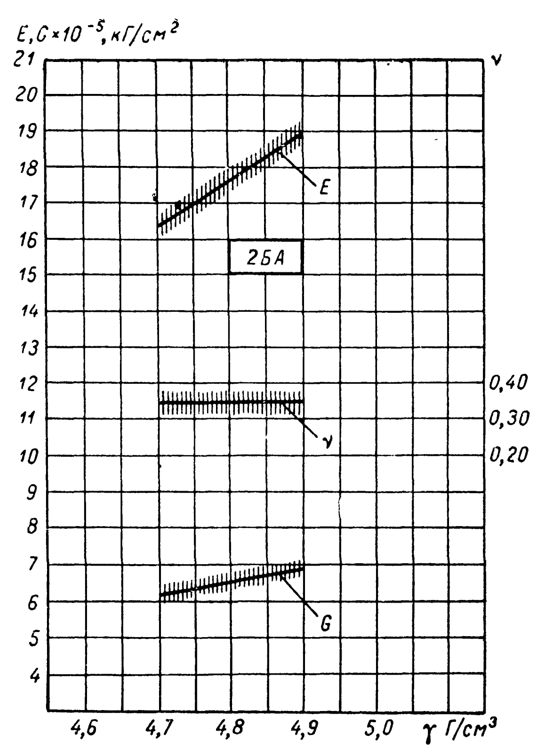


Рис. 43б. Зависимость упругих постоянных феррита 3БА от удельного веса.

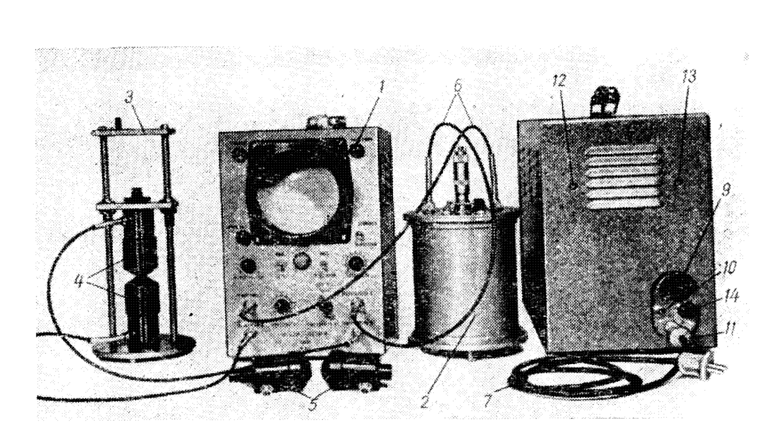


Рис. 44. Общий вид прибора УЗИС-ЛЭТИ.

электронного устройства смонтированы переключатель питания *9*, дополнительное фокусирующее устройство *10*, настройка горизонтальной развертки *12* и вертикальной развертки *13*, а также предохранитель *14*.

Измерение скорости распространения ультразвуковых колебаний в образцах твердых тел прибором УЗИС-ЛЭТИ основано на сравнении времени распространения ультразвука в образце и в эталонной жидкости, для которой скорость распространения ультразвука известна. Генератор коротких импульсов возбуждает одновременно пьезопластины в эталонной (ЭЛ) и измерительной (ИЛ) линиях.

Импульсы ультразвуковых колебаний, преобразованные приемными пьезопластинами в электрические колебания, подаются на усилитель прибора и наблюдаются на электроннолучевой трубке. Вращением микрометрического винта эталонной линии оператор может менять расстояние между пьезопластинами и, следовательно, время прохождения ультразвукового импульса через ЭЛ. При измерениях совмещают, вращая микрометрический винт, изображения импульсов на экране прибора, то есть делают время прохождения ультразвука через эталонную и измерительную линии одинаковыми.

Производят два таких отсчета: первый — без образца в измерительной линии, второй — с образцом. Разница времени прохождения ультразвука в измерительной линии без образца и с образцом определяется по длине столба жидкости, в котором время прохождения ультразвука соответствует времени прохождения его в образце.

Следовательно, зная длину образца l, скорость распространения ультразвука в эталонной жидкости $v_{эт}$ и длину столба эталонной жидкости L, скорость распространения ультразвуковых колебаний $v_{обр}$ определим из формулы

$$v_{обр} = \frac{l}{L} v_{эт}. \qquad (33)$$

Длину столба эталонной жидкости определим с помощью микрометрического винта путем двух замеров, тогда формула сводится к виду

$$v_{обр} = \frac{l}{П_2 - П_1} v_{эт}, \qquad (34)$$

где $П_2$ — отсчет по шкале микрометрического винта (с образцом), *мм*; $П_1$ — отсчет по шкале микрометрического винта (без образца), *мм*; l — длина образца, *мм*; $v_{эт}$ — скорость распространения ультразвуковых колебаний в эталонной жидкости, определяемая по особому графику в зависимости от окружающей температуры.

Технические данные прибора УЗИС-7.

1. Рабочие частоты: продольные колебания 1,67 *Мгц* и 5 *Мгц*, поперечные колебания 1,67 *Мгц*.
2. Диапазон измеряемых скоростей: 800÷6000 *м/сек*.
3. Точность измерения 0,5—2%.
4. Питание: сеть переменного тока напряжением 220 *в* с частотой 50 *гц*.
5. Потребляемая мощность: 100 *вт*.
6. Вес всей установки: 18 *кГ*.
7. Образец цилиндрический, диаметр 15 *мм*, высота 12 *мм*, торцевые поверхности строго плоско-параллельные, шлифованные.

К достоинствам прибора относится простота работы на нем после определенных навыков, сравнительно высокая точность измерений и др.

Таблица 7

Упругие постоянные некоторых марок ферритов

Марки ферритов	$E\times10^{-5}$ *кГ/см²*	$G\times10^{-5}$ *кГ/см²*	ν
10ВЧ1	10,0—13,0	4,3—5,0	0,29—0,31
20ВЧ	4,5—5,5	1,9—2,3	0,20—0,21
50ВЧ2	5,0—6,0	2,1—2,5	0,22—0,24
1000НМ3	9,5—10,0	3,7—3,9	0,27—0,29
2000НМ1	8,0—9,5	3,2—3,8	0,25—0,27
200НН2	10,0—13,0	3,8—5,0	0,25—0,30
55НН	16,9—17,2	6,5—6,7	0,28—0,31
1БИ	11,0—15,0	4,5—5,9	0,24—0,26
2БА	16,4—19,0	6,1—6,9	0,33—0,34
3БА	18,0—20,0	6,6—7,4	0,35—0,40

Примечания: 1. Значительный разброс параметров вызван различием плотности образцов даже в пределах одной партии.

2. Испытывалось 60 — 120 образцов ферритов каждой марки.

К недостаткам можно отнести сравнительно высокие требования, предъявляемые к специально изготовленным образцам и длительные испытания образца при поперечных колебаниях, так как необходимо время для высыхания склеивающей контакты жидкости.

Проведение испытаний, как на приборе ИЧМК-2 так и на УЗИС-ЛЭТИ, показали, что оба прибора позволяют определять упругие постоянные с достаточной точностью. В табл. 7 сведены результаты измерений упругих постоянных некоторых марок ферритов. Как видно из таблицы, наибольшие значения модуля нормальной упругости соответствуют ферритам, имеющим небольшую пористость и наибольшую удельную плотность, т. е. таким ферритам, как магнитножесткие бариевые ферриты 1БИ, 2БА, 3БА и магнитномягкие никель-цинковые ферриты 55НН, 200НН2.

§ 6. Прочность при кручении

При испытании на кручение хрупких материалов получают ряд характеристик: прочность при кручении, прочность при срезе, модуль сдвига и условную прочность при растяжении. Существует много машин и установок для испытаний на кручение. Очень важно при проведении этих испытаний исключить возможность изгиба.

Испытания на кручение проводились на установке, разработанной В. Р. Дуровкиным. При снятии температурных зависимостей установка помещалась в печь конструкции канд. техн. наук К. И. Воловодова [30] (рис. 45). Установка состоит из каркаса печки *23*, вдоль которого внутри положен слой стекловаты *27* с прослойкой асбеста *24*. Между асбестовыми прокладками помещена спираль нагревателя *26*, концы которой выведены на внешнюю колодку *31*. В верхней части каркаса сделано отверстие для патрубка *25*, через которое подаются пары жидкого азота. Патрубок через штуцер и регулирующий клапан присоединяется к дьюару с жидким азотом. Кроме того, в верхней части каркаса сделано отверстие *28* для установки термометра или термопары и отверстие *29* для стоек зеркального прибора Мартенса. В торцевой части каркаса проделаны отверстия для прохода валиков центрирующих захватов,

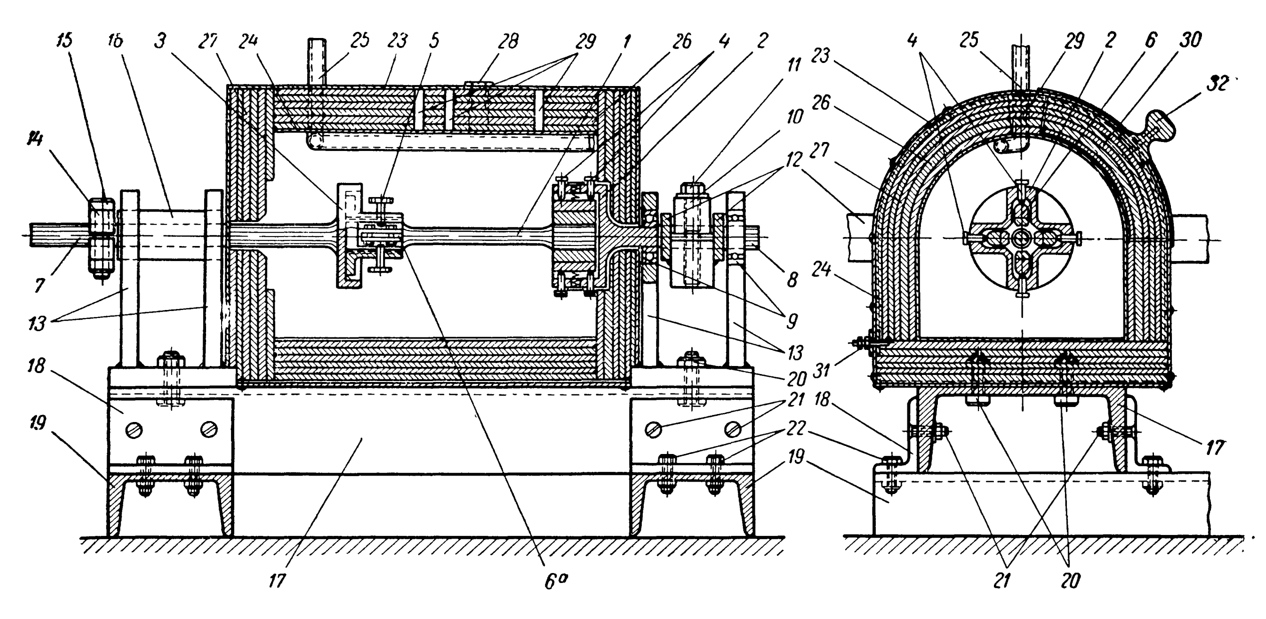


Рис. 45. Установка для испытания образцов ферритов на кручение при температуре —100÷ +125° С.

Наружная часть валика *8* закреплена в подшипнике *9*, впрессованном в стойки *13*, свободный конец валика *7* после установки образца *1* и его центровки зажимается накидным кольцом *14* и крепится болтом *15*. Захват с валиком неподвижно фиксируется на установке с помощью кронштейна. На валик *8* между стойками *13* надета втулка *10* и разрезное кольцо силоизмерительного рычага *12*, сжимаемое винтом *11*.

Образец вставляется в захваты *2*, *3* и центрируется в них винтами *4*, *5*, перемещающими зажимные вкладыши *6* в захвате *2* и сжимающие прокладки *6*а в захвате *3*. При установке образца валик *7* выдвигается влево, перемещаясь по втулке *16*. После закрепления и центровки образца в захватах, валик *7* закрепляется неподвижно, а на валик *8* через рычаг подается крутящий момент.

Для смены и установки образцов в каркасе сделан проем со съемной крышкой *30* и рукояткой *32*. Вся установка укреплена на раме из швеллера № 10 *17*, *19* и угольников *18*. Последние связаны с швеллером болтами *21*, *22*. Каркас прикреплен к верхнему швеллеру болтами *20*. Общая длина каркаса — 260 *мм*, ширина — 185 *мм*.

Испытаниям на кручение подвергались образцы цилиндрической формы с утолщенными концами. Переход от рабочей прямолинейной части образца к утолщенной, как правило, осуществлялся плавно. Прочность при кручении (τ) определялась как отношение максимального крутящего момента ($M_{\text{кр. макс}}$) к полярному моменту сопротивления поперечного сечения образца $\left(W_p = \frac{\pi d^3}{16} \simeq 0{,}2d^3\right)$, т. е.

$$\tau_{\text{кр}} = \frac{M_{\text{кр. макс}}}{W_p} \cong \frac{M_{\text{кр. макс}}}{0{,}2d^3}, \qquad (35)$$

где d — диаметр рабочей части образца.

При каждой температуре (+100, +20, —50, —100° С) подвергались испытанию 15 образцов. При этом отбирались образцы, не имеющие искривлений в рабочей части. Те из них, у которых разрушение происходило вблизи утолщенной части, в окончательных расчетах не учитывались.

Нагрев или охлаждение образца производились постепенно со скоростью ±100° С за 30 *мин*. При заданной температуре образец в печи выдерживался 15 *мин*, и затем медленно производилось нагружение образца до разрушения.

Образцы всех марок ферритов, подвергшихся испытанию, как магнитномягких так и магнитножестких, разрушались по типу «хрупких» материалов за счет наибольших растягивающих напряжений (как материал,

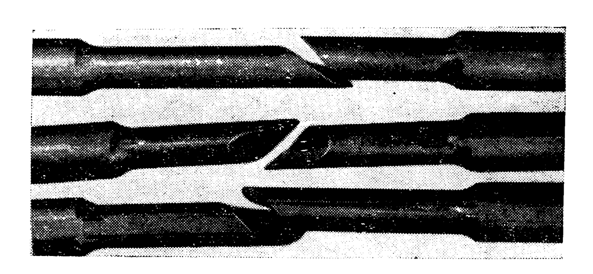


Рис. 46. Вид образцов феррита 2000НМ1, испытанных на кручение при температуре +100° С.

обладающий слабыми пластическими свойствами). На рис. 46 показан характер разрушения образцов ферритов 2000НМ1.

В табл. 8 приведены данные испытаний некоторых марок магнитномягких и магнитнотвердых ферритов на

Таблица 8

Зависимость прочности при кручении τ, *кГ/см²* от температуры

Марка ферритов	Температура, °С			
	+100	+20	—50	—100
10ВЧ1	150	155	170	190
20ВЧ	115	140	170	205
50ВЧ2	135	155	190	220
1000НМ3	180	200	260	340
2000НН1	150	170	215	290
1БИ	505	440	450	495
2БА	575	490	690	710
3БА	610	490	671	—

определение предела прочности при кручении. Характерно, что у магнитномягких ферритов прочность при кручении, как при растяжении и изгибе, снижалась с повышением температуры, в то время как у магнитножестких ферритов она повышалась как с ростом температуры, так и с понижением от некоторого экстремального значения (рис. 47, 48).

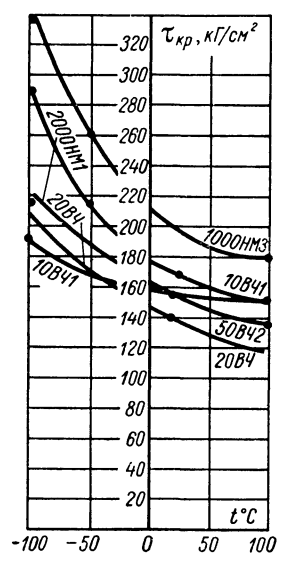


Рис. 47. Зависимость прочности магнитномягких ферритов при кручении от температуры.

Кроме того, если средний предел прочности при растяжении у магнитножестких ферритов выше

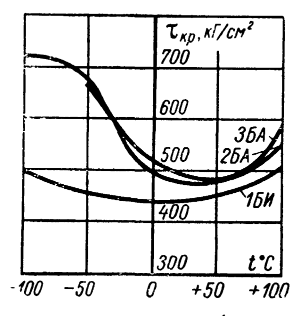


Рис. 48. Зависимость прочности магнитножестких ферритов при кручении от температуры.

среднего предела прочности при растяжении магнитномягких ферритов в среднем в два раза, при изгибе около трех раз, то при кручении почти в четыре раза.

§ 7. Ударная прочность и определение твердости

Ударной прочностью материала принято считать величину работы, затраченной для разрушения образца при изгибном ударе на маятниковом копре. Удельную ударную прочность определяют обычно как отношение величины затраченной на разрушение работы к площади поперечного сечения образца в месте излома, или к объему части образца между опорами копра.

Ударная прочность материала не является расчетной характеристикой, входящей в какую-либо формулу. Обычно по удельной ударной прочности судят о способности того или иного материала сопротивляться ударному воздействию.

Испытания проводились на маятниковом копре типа КМ-05 применительно к ГОСТ 4647—62. Основными характеристиками копра являются запас энергии, определяемый как произведение веса маятника на расстояние от оси его качания до центра тяжести, и центр удара, который находится по периоду колебания маятника.

Маятник весом P, поднятый на определенный угол и имеющий высоту центра тяжести h, будет обладать запасом энергии, равным Ph. После свободного падения и встречи с образцом маятник, затратив на разрушение образца часть запаса энергии, поднимается на определенный угол, при котором его центр тяжести займет высоту h_1.

Закрепленный на оси маятника поводок при движении после разрушения образца перемещает стрелку на высоту, пропорциональную h. Таким образом, стрелка отметит по шкале величину, пропорциональную разности высот $(h—h_1)$.

Работа, затраченная на разрушение образца, определяется по формуле как разность запасов энергии маятника до и после удара:

$$\Delta A = P(h - h_1), \qquad (36)$$

где ΔA — работа, затраченная на разрушение образца, *кГм*; P — вес маятника, *кГ*; h — высота подъема центра тяжести маятника относительно точки встречи бойка с образцом до удара, *м*; h_1 — высота подъема центра тяжести маятника относительно точки встречи бойка с образцом после удара, *м*.

По общепринятой и утвержденной ГОСТ 4647—62 методике за удельную ударную прочность принимается отношение затраченной на разрушение образцов работы A к площади поперечного сечения образца F, т. е.

$$a_F = \frac{A}{F}\left[\frac{кГм}{см^2}\right]. \qquad (37)$$

Проведенные испытания показали, что удельная ударная прочность различных хрупких материалов

в значительной степени зависит от формы и размеров образца [31]. Поскольку ударная прочность является качественной характеристикой, испытания проводились на образцах с одинаковой длиной ($l=70$ *мм*), но различным поперечным сечением (6×6, 8×8, 10×10 *мм*) при расстоянии между опорами, равном 40 *мм*.

Учитывая характер действия ударной нагрузки (изгибный удар), представляется возможным наряду с об-

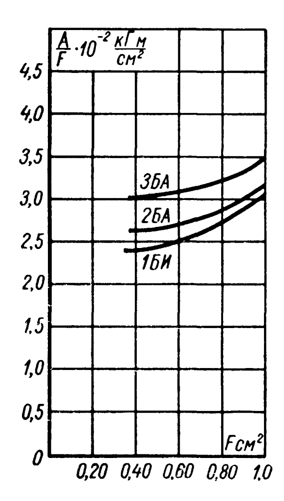


Рис. 49. Результаты определения ударной прочности магнитножестких бариевых ферритов по общепринятой методике.

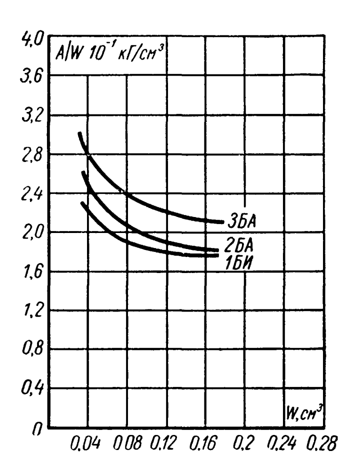


Рис. 50. Результаты определения ударной прочности магнитножестких бариевых ферритов по измененной методике.

щепринятой методикой, определять удельную ударную прочность хрупких материалов как отношение затраченной при изломе образцов работы к моменту сопротивления поперечного сечения образца (W). В этом случае разброс результатов оказывается меньше и влияние масштабно-технологического фактора на удельную ударную прочность лучше согласуется с аналогичными зависимостями при других видах испытаний (сжатие, растяжение, изгиб).

На рис. 49, 50 показаны сравнительные результаты определения ударной прочности магнитножестких ферритов 1БИ, 2БА, 3БА. Как видно из графиков, удельная

работа при испытании по общепринятой методике увеличивается с увеличением площади образца, что противоречит как статической, так и технологической теориям прочности. При определении удельной ударной прочности (a_w) как отношения затраченной работы (A) к моменту сопротивления поперечного сечения образца (W), т. е.

$$a_W = \frac{A}{W}\left[\frac{кГм}{см^3}\right], \qquad (38)$$

где $W = \frac{bh^2}{6}\,см^3$; характер наклона кривых сохраняется таким же, как и при других видах испытаний.

В табл. 9 приведены данные, характеризующие удельную прочность различных марок ферритов в зависимости от размеров поперечного сечения образцов по обеим методикам.

Таблица 9

Результаты определения удельной ударной прочности ферритов

Марка ферритов	Размеры образцов, *мм*					
	10 × 10 × 70		8 × 8 × 70		6 × 6 × 70	
	$к_1$	$к_2$	$к_1$	$к_2$	$к_1$	$к_2$
10ВЧ1	0,0343	0,180	0,0265	0,215	0,0292	0,288
20ВЧ	0,0266	0,140	0,0217	0,162	0,0225	0,223
50ВЧ2	0,0265	0,149	0,0236	0,183	0,0212	0,210
1000НМ3	0,0212	0,123	0,0228	0,179	0,0237	0,232
2000НМ1	0,0227	0,133	0,0220	0,175	0,0254	0,237
1БИ	0,0302	0,182	0,0249	0,188	0,0231	0,229
2БА	0,0318	0,182	0,027	0,2004	0,0262	0,261
3БА	0,0351	0,211	0,0307	0,2314	0,0302	0,304

Примечание: $к_1 = A/F$ [$кГм/см^2$]; $к_2 = A/W$ [$кГм/см^3$].

Проведенные эксперименты по определению зависимости ударной прочности от объема образца между опорами (рис. 51) подтверждают правильность определения удельной ударной прочности как отношения затраченной работы к моменту сопротивления сечения.

По определению терминологической комиссии АН СССР «Твердость — это способность материала сопротивляться проникновению в него другого, не полу-

чающего остаточных деформаций тела» [82]. Твердость не входит в какие-либо расчетные формулы, не является физической постоянной, а скорее является сложной функцией ряда физических свойств, которые по-разному сочетаются при различных методах испытания.

В некотором смысле твердость материала можно приравнять сопротивлению истиранию или износу. Эта характеристика интересна практически, так как она определяет срок службы материала при нормальном использовании, но, как известно, детали из феррита редко подвергаются такого рода воздействиям.

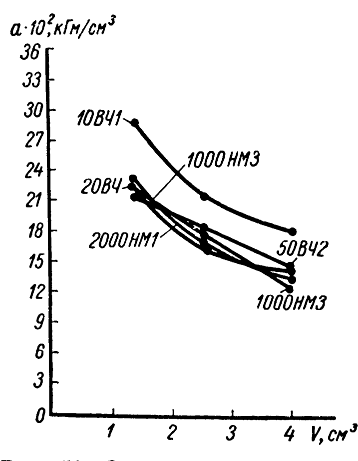


Рис. 51. Зависимость ударной прочности ферритов от объема части образца между опорами.

Устойчивость материала к царапанию другим материалом представляет собой другую характеристику твердости, а глубина проникновения индентера (шарика, пирамиды) в материал при определенных условиях является еще одним видом характеристики твердости.

Все эти методы — эмпирические и, хотя пользоваться можно любым из них, классификационное расположение материалов в ряду твердости может зависеть от метода испытания.

Определение твердости царапанием выполняется сравнительно просто, но результаты испытания часто бывают довольно неопределенными. Величина твердости оценивается по десятибалльной шкале (так называемая шкала Мооса), которая представляет собой последовательность ряда минералов различной твердости, расположенных в порядке ее возрастания. По этой шкале алмаз, стоящий в верхней ее части, имеет твердость 10, а твердость талька, стоящего последним, равна 1. При оценке твердости определяют, какие из минералов шкалы оставляют царапину на исследуемом материале. Ферриты имеют значения твердости по Моосу от 6 до 8, но испытание их не очень удобно для сравнительных

характеристик твердости различных видов ферритов по отношению друг к другу.

Большинство магнитномягких ферритов никель-цинковой системы имеют твердость 6—7, а марганцево-цинковой системы до 7—8.

Предпринимаются попытки разработать более надежный метод определения твердости царапанием, чем метод Мооса. Такие испытания для определения твердости металлов и сплавов основываются на исследовании следа, оставляемого алмазным скрайбером на материале при строго определенных условиях [83]. К сожалению, сообщений о подобных исследованиях на ферритах и керамике пока не было.

Реже пользуются динамическими методами измерения, в которых мерой твердости является высота отскакивания стального шарика от поверхности изучаемого материала (метод Шора) или время затухания колебания маятника, опорой которого служит исследуемый материал (метод Кузнецова — Ребиндера). Последний метод применили В. Р. Дуровкин и В. М, Мышалов для исследования влияния поверхностно-активных веществ на прочность ферритов.

Наиболее часто для измерения твердости пользуются методом вдавливания, при котором величина твердости равна нагрузке, отнесенной к поверхности отпечатка, или обратно пропорциональна глубине отпечатка при некоторой фиксированной нагрузке. Отпечаток обычно производят шариком из закаленной стали (метод Бринелля, Роквелла) или алмазной пирамидой (метод Роквелла, Виккерса, измерение микротвердости) [84]. Испытание материалов на твердость вдавливанием под нагрузкой 2÷200 *Г* алмазной пирамиды с квадратным основанием и углом при вершине между противолежащими гранями 136° получило название «испытаний на микротвердость».

Испытания на микротвердость обычно проводят на приборах ПМТ-2 и ПМТ-3, предложенных советским ученым М. М. Хрущевым, в таком же порядке, как и испытания на твердость на приборе типа Виккерса. В результате испытания определяется величина диагонали отпечатка и подсчитывается число твердости как частное от деления приложенной нагрузки (*P*, *кГ*) на поверхность полученного отпечатка (*F*, *мм*²), число

твердости выражается в $кГ/мм^2$:

$$H = \frac{P}{F} = \frac{1{,}854P}{d^2} \; [кГ/мм^2].$$

Если выразить P в граммах, а d (диагональ квадрата отпечатка) в микронах, то формула примет вид:

$$H = \frac{1854P}{d^2} \; [кГ/мм^2].$$

Обычно бывает необходимо получение не менее трех отпечатков для определения твердости испытуемого материала, но для хрупких материалов это число необходимо увеличить. Механизм вдавливания носит весьма сложный характер, охватывая эффекты упругой деформации, пластического течения и смятия феррита под индентером. Необходимо отметить, что число твердости в какой-то степени зависит от нагрузки, под которой проводятся испытания. Поэтому, когда сравниваются числа твердости материалов, определенные по методу «испытаний на микротвердость», необходимо точно указывать условия испытаний [85].

При выборе места расположения отпечатка на поверхности образца необходимо учитывать, что феррит имеет значительную пористость и мелкозернистую структуру, а поэтому М. М. Хрущев и Е. С. Беркович рекомендуют расстояния от центра отпечатка до края образца (зерна) или между центрами соседних отпечатков брать не менее $5d$ (d — диагональ отпечатка). Толщина испытуемого образца должна быть не менее 2—$3d$, учитывая структуру феррита и его хрупкость. Так как испытуемое зерно залегает в массе приблизительно таких же зерен, связанных пластификатором, то в зависимости от цели испытаний (определение твердости зерен феррита или всей массы образца) могут быть взяты отпечатки и несколько большие по величине.

В связи с неоднородностью величины зерен по поверхности образца целесообразно для каждого определения H производить не менее 10 наколов в различных местах образца.

Результаты, полученные при измерении твердости образцов, очевидно будут недостаточно надежными, если проводить испытания при различных нагрузках. Ф. Кларк в своей работе [86] отмечает, что способ опре-

деления микротвердости по методу Виккерса при нагрузках менее 100, 200 *Г* дает значения, не отвечающие обычным закономерностям отношений глубины и нагрузки накола. Особенно это проявляется при измерении твердости спеченных изделий, имеющих мелкозернистую структуру и большую твердость. Он также считает, что диаметр основания накола (отпечатка) не должен превышать одной пятой диаметра зерен, составляющих данную структуру.

Определение микротвердости никель-цинковых ферритов дало значения $H=850—950$ *кГ/мм*^{2} для различных марок ферритов. Для бариевых магнитножестких ферритов эта величина составляла 700—800 *кГ/мм*^{2}.

§ 8. Выводы по первой главе

При испытании ферритовых материалов наблюдается существенное различие в характеристиках прочности в зависимости от схемы нагружения (растяжение, изгиб сосредоточенной силой, чистый изгиб и т. п.), хотя разрушение во всех этих случаях наступает под действием максимальных растягивающих напряжений.

Приведенные в табл. 10 результаты испытаний образцов различных систем и марок ферритов позволяют судить о зависимости характеристик прочности от схемы нагружения. Так, для бариевых ферритов прочность при изгибе в 2,5—3 раза превышает прочность при растяжении, для ферритов 20ВЧ и 50ВЧ2 в 2,1—2,2 раза и т. д.

Эти результаты не могут претендовать в большинстве случаев на высокую точность, так как при испытаниях не учитывался объем образцов и различные технологические условия их формирования (прессовка, обжиг и т. д.). Однако они однозначно указывают на то, что прочность образцов при растяжении меньше, чем при чистом изгибе, хотя казалось бы, что в обоих случаях разрушение должно иметь место (как это следует из первой теории прочности) при достижении минимальными растягивающими напряжениями критических значений.

Ферриты (см. табл. 10) имеют значительную пористость, от 9—12% у ферритов 2000НМ1, до 33—42% у ферритов 20ВЧ. Проведенные эксперименты подтвердили высказывания авторов [6, 9, 23] о том, что для

Сводная таблица механических харак

Система феррита	Марки феррита	t, °C	Прочность, $кГ/см^2$			
			растяжение $\sigma_р$	сжатие $\sigma_{сж}$	изгиб $\sigma_{из}$	кручение τ
Высокочастотные никель-цинковые и др.	10ВЧ1	—100	265	1800	550	190
		—50	210	2200	475	170
		+20	150	2600	380	155
		+100	115	3300	330	150
	20ВЧ	—100	120	250	235	205
		—50	95	1000	190	170
		+20	70	1050	150	140
		+100	65	1150	110	115
	50ВЧ2	—100	150	1300	300	220
		—50	125	1400	265	190
		+20	95	1550	220	155
		+100	70	1650	200	135
Марганец-цинковые	1000НМ3	—100	225	1400	395	340
		—50	180	1600	345	260
		+20	120	1680	300	200
		+100	100	2500	265	180

Таблица 10

теристик некоторых марок ферритов

Модуль Юнга $E \times 10^{-6}$, *кГ/см²*	Модуль сдвига $G \times 10^{-5}$, *кГ/см²*	Коэффициент Пуассона ν	Ударная прочность $a \times 10^{-2}$		Удельный вес, *Г/см³*	Пористость, %	Температурный коэффициент линейного растяжения $\alpha \times 10^{6}$
			A/F, *кГм/см²*	*A/W*, *кГм/см³*			
1,17—1,45	4,3—5,0	0,29- 0,31	2,9	29,0	4,2—4,5	—	—
0,45—0,55	2,0—2,3	0,2—0,21	2,95	22,3	3—3,2	34,5—42,0	5,8—6,5
0,5—0,6	2,1—2,5	0,22—0,24	2,1	21,0	3,2—3,5	25—35	5,0—5,5
0,9—1,1	3,7—4,0	0,27—0,29	2,37	23,2	3,8—4,2	12—20	9—9,8

Система феррита	Марки феррита		t, °C	Прочность, $кГ/см^2$			
				растяжение $\sigma_р$	сжатие $\sigma_{сж}$	изгиб $\sigma_{из}$	кручение τ
Марганец-цинковые	2000НМ1		—100	290	1450	535	290
			—50	230	1500	490	215
			+20	160	1600	450	170
			+100	130	2000	410	150
Бариевые	изотропные	1БИ	—100	—	3750	1350	495
			—50	290	2750	1000	450
			+20	260	2300	660	440
			+100	240	2250	585	505
	анизотропные	2БА	—100	—	3250	1150	710
			—50	310	2350	1000	690
			+20	250	1950	750	490
			+100	240	2000	600	575
		3БА	—100	—	—	875	—
			—50	420	2900	840	670
			+20	310	2200	770	490
			+100	265	2000	720	610
Гранат $Bi_{3-2x}Ca_{2x}Fe_{5-x}V_xO_{12}$	x = 1,25		+20	400	—	790	—
	x = 1,4		+20	300	—	620	—
	x = 1,5		+20	310	—	650	—
Никель-цинковые	55НН		+20	150	1100	315	—
	200НН2		+20	160	1530	270	—
	45НН		+20	76	1340	165	—

Продолжение

Модуль Юнга $E \times 10^{-6}$, *кГ/см²*	Модуль сдвига $G \times 10^{-5}$, *кГ/см²*	Коэффициент Пуассона ν	Ударная прочность $a \times 10^{-2}$		Удельный вес, *Г/см³*	Пористость, %	Температурный коэффициент линейного растяжения $\alpha \cdot 10$
			A/F, *кГм/см²*	A/W, *кГм/см³*			
0,8—0,95	3,2—3,8	0,25—0,27	2,54	23,7	3,8—4,1	9—15	9—11
1,1—1,5	4,5—5,9	0,24—0,26	2,3	23,0	4,4—4,7	—	—
1,65—1,9	6,1—6.9	0,33—0,34	2,60	26	4,7—4,9	—	—
1,8—2,0	6,6—7,4	0,35—0,4	3,0	30,4	4,8—5,0	—	—
1,0—1,2	4,0—4,7	0,22—0,27	—	—	5,1—5,2	—	—
1,2—1,5	5,1—5,9	0,19—0,2	—	—	5,0—5,1	—	—
0,7—0,8	2,8—3,3	0,25	—	—	5,0—5,1	—	—
1,7—1,72	6,5—6,7	0,28—0,31	1,80	10,5	4,95—5,25	—	5,7—6,5
1,0—1,3 1,2—1,35	3,8—5,0 5,0—5,2	0,25—0,3 0,23—0,25	1,80 1,65	10,8 9,4	4,8—5,1 4,4—4,9	—	7,8—8,1 5,7—6,4

Таблица 11

Влияние масштабно-технологического фактора на прочность ферритов

Вид испытания	t, °С	Размеры образцов, *мм*	Марки ферритов: 10ВЧ1	20ВЧ	50ВЧ2	1000НМ3	2000НМ1	1БИ	2БА	3БА	Примечание
Предел прочности при сжатии $\sigma_{сж}$, *кГ/см²*	+20	$d = 20$; $h = 30$	—	1050	1550	1680	1600	2300	1950	2170	
		$d = 15$; $h = 22,5$	—	1800	1700	2000	1750	2420	2200	2660	
		$d = 10$; $h = 15$	—	2200	1850	2300	1950	2600	2320	3050	
Предел прочности при изгибе $\sigma_{из}$, *кГ/см²*	+20	6 × 10 × 60	395	220	400	390	475	720	800	845	
		8 × 10 × 80	325	185	350	380	450	690	765	800	
		10 × 10 × 100	315	160	300	375	435	660	750	780	
	+100	6 × 10 × 60	380	130	310	385	385	—	—	—	
		8 × 10 × 80	345	160	360	370	380	—	—	—	
		10 × 10 × 100	310	150	285	365	375	—	—	—	
	—50	6×10×60	345	160	330	430	525	—	—	—	
		8×10×80	355	150	320	455	545	—	—	—	
		10×10×100	390	180	310	510	565	—	—	—	
Удельная ударная прочность A/F, *кГм/см²* × 10^{-2}	+20	6×6 ×70	2,9	2,25	2,12	2,37	2,54	2,3	2,6	3,0	
		8×8 ×70	2,65	2,17	2,36	2,28	2,20	2,5	2,7	3,1	
		10×10×70	3,43	2,66	2,65	2,12	2,27	3,0	3,2	3,5	
Удельная ударная прочность A/W, *кГм/см³* × 10^{-2}	+20	6 × 6 × 70	29,0	22,3	21,0	23,2	23,7	23,0	26,0	30,4	
		8 × 8 × 70	21,5	16,2	18,3	17,9	17,5	18,8	20,0	23,14	
		10 × 10 × 70	18,0	14,0	14,9	12,3	13,3	18,2	18,2	21,1	

хрупких материалов пористость является параметром, существенно влияющим на прочностные свойства и на величину упругих постоянных. Как видно из табл. 10 и рис. 43, 43, *а,* 48, *б,* прочность и величина упругих постоянных с увеличением пористости (уменьшением удельного веса) значительно снижается.

Результаты исследования влияния масштабного эффекта на прочность ферритов при сжатии и изгибе,

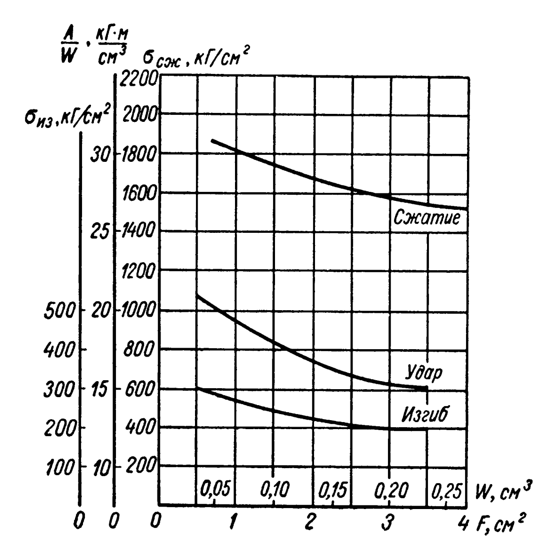


Рис. 52. Влияние масштабно-технологического фактора на свойства феррита 50ВЧ2 при различных видах деформации.

а также при определении удельной ударной прочности сведены в табл. 11. Из нее ясно, что прочность при всех видах испытаний уменьшалась с увеличением объема и площади поперечного сечения образцов, причем при $t = +20°$ С весьма значительно.

Форма кривых на рис. 52, 53 показывает, что темп понижения хрупкой прочности при различных видах деформации и понижение величины модуля нормальной упругости при увеличении размеров образцов постоянно замедляется и асимптотически стремится к определенному пределу. Теоретический смысл этого предела

состоит в том, что, начиная с некоторого достаточно большого размера, в изделии будет налицо полный набор всех возможных неоднородностей. Поэтому практически мы подходим к нему тем ближе, чем крупнее образец и чем больше его объем.

Таким образом, вполне можно согласиться с выводами Шевандина и Маневич [15], что если говорить о рациональном испытании при каком-либо одном размере, то последний должен быть выбран по возможности большим и испытан при возможно более однородном напряженном состоянии с тем, чтобы установить наименьшее возможное значение хрупкой прочности для данного материала.

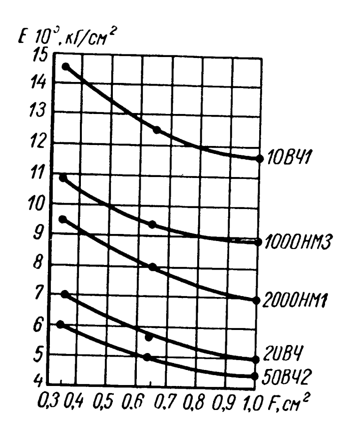


Рис. 53. Влияние масштабно-технологического фактора на величину модуля Юнга магнитномягких ферритов.

Следует указать, что, кроме собственно физического эффекта масштаба, обусловленного структурной неоднородностью строения материала, может иметь место и технологический эффект масштаба, обусловленный технологической неоднородностью, особенно характерной для очень больших изделий. Так, при прессовании образцов большого размера пористость слоев, находящихся в глубине образца, будет заведомо большей. Различие условий спекания образцов различных размеров при одних и тех же температурах также существенно скажется на распределении пористости, плотности, а следовательно, и прочности образцов.

Учитывая, что большинство изделий из феррита имеет значительно меньшие размеры, чем образцы, изготовленные для испытаний, прочностные характеристики непосредственно ферритовых изделий будут намного выше, чем снятые при экспериментах с образцами.

Влияние температуры на прочностные свойства ферритов исследовалось при испытаниях на растяжение, сжатие, изгиб и кручение образцов.

Как видно из табл. 10, прочность при повышении температуры от —100 до +100° С значительно снижалась у всех марок ферритов, на которых проводились эксперименты, и при различных схемах нагружения, за исключением испытаний на сжатие магнитномягких ферритов, когда прочность при сжатии повышалась с увеличением температуры. Оценка прочности ферритовых материалов не может быть достаточно надежной, если не учитывать рассеяние характеристик прочности, которое имеет место в этом случае.

Значительное рассеяние результатов испытаний нельзя объяснить лишь недостатками технологии изготовления, оно является общей закономерностью. Об этом, в частности, свидетельствует тот факт, что длительное совершенствование технологии изготовления не может свести к минимуму разброс результатов испытания на прочность.

Необходимо отметить, что разброс результатов испытаний при проведении исследований на низких температурах (—100, —50° С) значительно меньше, чем при повышенных и нормальных температурах (+20, +100° С). Так, например, если при испытании на сжатие 15 образцов феррита 10ВЧ1 при температуре +100° С разброс на прочность составил 2400÷4250 *кГ/см*², то при тех же испытаниях при $t = -100°$ С 1420÷1950 *кГ/см*². Для феррита 2000НМ1 соответственно при $t = +100°$ С $\sigma_{сж} = 1280 \div 2500$ *кГ/см*², а при $t = -100°$ С $\sigma_{сж} = 1200 \div 1600$ *кГ/см*².

Глава вторая

ВЛИЯНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ФЕРРИТОВ

§ 9. Основные положения

А. Магнитострикция

Влияние механических напряжений на электромагнитные параметры ферритов обусловливается магнитноупругим эффектом, термодинамически обратным эффекту магнитострикции.

Магнитострикцией называется изменение объема V и размеров l тела при его намагничивании. В первую

очередь магнитострикция обусловливается силами магнитного взаимодействия между атомами в кристаллической решетке [32, 34] и связана с величинами констант кристаллографической магнитной анизотропии и упругих постоянных [2, 34, 35].

В области технического намагничивания наблюдается в основном линейная магнитострикция $\lambda = \frac{\Delta l}{l}$. Объемная магнитострикция $\omega = \frac{\Delta V}{V}$ в этой области мала по величине и вызывается влиянием размагничивающего фактора и процессами вращения [53]. В области паропроцесса магнитострикция имеет целиком объемный характер и объясняется силами обменного взаимодействия [2, 3, 34].

По второму правилу четных эффектов [32] продольная магнитострикция $\lambda_{\parallel}$, замеряемая в направлении намагничивающего поля, сопровождается противоположной по знаку поперечной магнитострикцией $-\lambda_{\perp}$, при этом, если $\frac{\Delta V}{V} = 0$, то

$$-\lambda_{\perp} = \frac{1}{2}\lambda_{\parallel}. \tag{39}$$

Величина магнитострикции зависит от напряженности намагничивающего поля и в сильных полях достигает своего предельного значения, называемого магнитострикцией насыщения λ_s. Магнитострикция некоторых ферритов при определенных значениях поля изменяет свой знак (эффект Виллари). Линейная магнитострикция анизотропна и в зависимости от направления в монокристалле может изменять свою величину и знак (рис. 54).

Акуловым [32] получена следующая зависимость значений магнитострикции насыщения от направления в монокристаллах кубической симметрии:

$$\lambda_s = a_0 + \frac{3}{2}\lambda_{100} \sum_{i=1,2,3\ldots} \left(\alpha_i^2\beta_i^2 - \frac{1}{3}\right) + 3\lambda_{111} \sum_{i \neq j} \alpha_i\alpha_j\beta_i\beta_j, \tag{40}$$

где a_0 — аддитивная постоянная; λ_{100} и λ_{111} — магнитострикция насыщения в направлениях ребра и диагонали

куба; α и β — направляющие косинусы вектора намагниченности и направления измерения длины относительно тетрагональных осей кристалла.

Магнитострикция насыщения в поликристаллическом состоянии определяется по формуле

$$\lambda_s = \frac{2\lambda_{100} + 3\lambda_{111}}{5}. \quad (41)$$

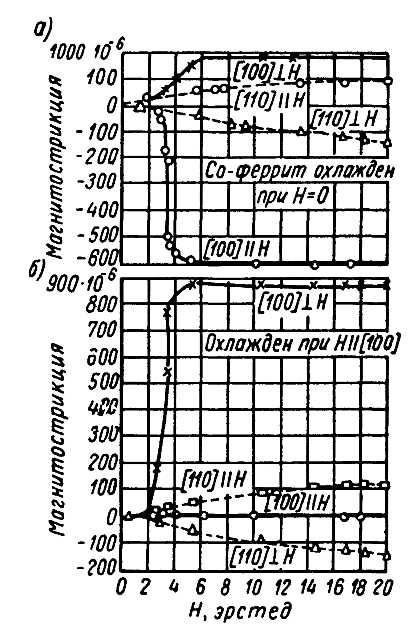


Рис. 54. Поперечная и продольная магнитнострикция феррита в различных кристаллографических направлениях [41].

Данные по магнитострикции ферритов приводятся в работах [37—47]. Магнитострикция ферритов зависит от их состава и, как правило, отрицательна. Большую положительную магнитострикцию имеет только ферроферрит $FeFe_2O_4$ (магнетит). В работе [38] показано, что отклонения от стехиометрического состава, приводящие к избытку магнетита и появлению ионов Fe^{+2}, снижают величину отрицательной магнитострикции, которая может стать равной 0 или принять небольшие положительные значения (рис. 55).

Марганец-цинковые ферриты с большим содержанием Fe^{+2} имеют значения $\lambda_s \leqslant 1 \cdot 10^{-6}$ [43]. К аналогичным результатам приводят добавки окислов некоторых двухвалентных металлов, образующих антиферромагнитные компоненты CdO, ZnO (рис. 56), BaO и пр., а также присутствие γFe_2O_3 [36, 37, 43].

Величины магнитострикции насыщения некоторых ферритов при комнатной температуре приведены в табл. 12 и 13.

Зависимость магнитострикции ферритов от температуры исследовалась Жуковым [40]. Им предложены

следующие уравнения:

$$|\lambda_s| = J_s^2 [C - C_1(T)], \qquad (42)$$

а при малых спин-орбитальных взаимодействиях

$$|\lambda_s| = C \cdot J_s^2, \qquad (43)$$

где C и C_1 — некоторые постоянные; T — температура в градусах термодинамической шкалы.

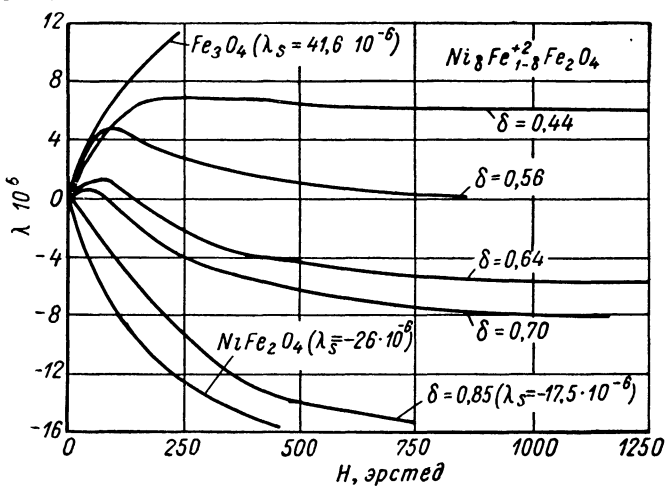


Рис. 55. Зависимость магнитнострикции от магнитного поля для поликристаллических образцов системы $Ni_\delta Fe_{1-\delta}Fe_2O_4$ [38].

Магнитострикция ферритов является структурно-чувствительным параметром и зависит от структуры, пористости, внутренних напряжений, текстуры [41]) и пр. Определение магнитострикции сводится к измерениям

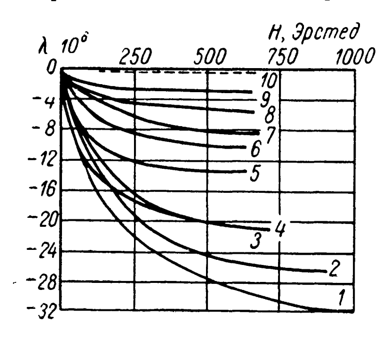


Рис. 56. Зависимость магнитострикции твердых растворов (Ni; Zn)Fe_2O_4 от напряженности внешнего поля при различных соотношениях между ферромагнитным $NiFe_2O_4$ и неферромагнитным ($ZnFe_2O_4$) компонентами:

1 — 100 : 0, *2* — 90 : 10, *3* — 80 : 20, *4* — 70 : 30, *5* — 60 : 40, *6* — 50 · 50, *7* — 40 : 60, *8* — 35 : 65, *9* — 30 · 70, *10* — 25 : 75 [37].

Таблица 12

Продольная магнитострикция насыщения некоторых моно-и поликристаллических ферритов

Феррит	$\lambda_{100} \cdot 10^6$	$\lambda_{111} \cdot 10^6$	$\overline{\lambda}_S \cdot 10^6$
$FeFe_2O_4$ (магнетит)	—19	81	41
$NiFe_2O_4$	—	—	—26
$Ni_{0,8}Fe_{2,2}O_4$	—36	—4	—17
$MnFe_2O_4$	—	—	—5
$Mn_{0,96}Fe_{1,86}O_4$	—35	—1	—15
$MgFe_2O_4$	—	—	—6
$CoFe_2O_4$	—	—	—110
$Co_{0,8}Fe_{2,2}O_4$	—590	120	—210
$Co_{1,1}Fe_{1,9}O_4$	—250	—	—
$CuFe_2O_4$	—	—	—10
$Li_{0,5}Fe_{2,5}O_4$	—	—	—1
$Mn_{0,6}Zn_{0,1}Fe_{2,1}O_4$	— 14	14	3
$Co_{0,2}Zn_{0,2}Fe_{2,2}O_4$	—210	110	—18
$Co_{0,3}Mn_{0,2}Fe_2O_4$	—200	65	—40
$Ni_{0,36}Zn_{0,64}Fe_2O_4$	—	—	—11
$Ni_{0,5}Zn_{0,5}Fe_2O_4$	—	—	—16
$Ni_{0,64}Zn_{0,36}Fe_2O_4$	—	—	—21
$Ni_{0,98}Co_{0,02}Fe_2O_4$	—	—	—26
$Li_{0,5}Fe_{2,3}Al_{0,2}O_4$	—	—	6
$Li_{0,5}Fe_{20,5}Al_{0,45}O_4$	—	—	4
$Li_{9,5}Fe_{1,9}Al_{0,6}O_4$	—	—	3
$4MgOCo_2O_33Fe_2O_3$	—	—	—25
$2MgOCo_2O_3Fe_2O_3$	—	—	—23
$4MgOCo_2O_3Fe_2O_3$	—	—	—9

изменений длины или деформации образца во время его намагничивания.

Классическим методом определения магнитострикции является метод механооптического рычага [3]. При этом методе изменение длины образца усиливается с помощью механического рычага, который приводит во вращение зеркальце, отбрасывающее зайчик на измерительную шкалу. Метод позволяет измерять смещения $\Delta l = 10^{-7}$ *см.*

В последние годы наибольшее распространение получил тензометрический метод, при котором магнитострикционная деформация образца изменяется

Таблица 13

Продольная магнитострикция насыщения магний-марганцевых ферритов [44]

Состав феррита (мол, %)			$\lambda_{100}\cdot 10^6$	$\lambda_{111}\cdot 10^6$	$\lambda_S\cdot 10^6$
MnO	MgO	Fe_2O_3			
0	57	43	—25,8	—11,3	—17,1
7	50	43	—29,2	—12,7	—19,3
13	44	43	—32,0	—13,6	—21,0
20	37	43	—31,6	—12,6	—20,2
27	30	43	—34,6	—13,5	—21,9
35	22	43	—35,6	—11,4	—20,8
57	0	43	—43,0	—12,6	—24,8

с помощью наклеенных на него проволочных тензометров [46, 48]. Из прочих методов следует отметить метод колец Ньютона (метод проф. Розинга) [49] и метод биений, при котором в результате магнитострикционного смещения изменяется емкость конденсатора. При этом в результате перестройки контура изменяется частота сигнала. Сложение его с первоначальным сигналом вызывает биения, величина которых зависит от величины вызвавшего их смещения.

Объемную магнитострикцию обычно определяют по изменению уровня жидкости в сосуде при намагничивании погруженного в него образца [3].

Б. Магнитоупругий эффект

Магнитоупругий эффект заключается в изменении хода процессов намагничивания под влиянием внешних механических напряжений σ. Для ферритов, как для хрупких материалов, предел упругости которых близок к пределу прочности, а зона пластических деформаций мала, практический интерес представляет рассмотрение влияния только упругих напряжений.

Теоретически этот вопрос рассмотрен целым рядом авторов [2—4, 10, 32—35]. В соответствии с доменной теорией [3, 33, 34] влияние упругих напряжений на магнитные свойства зависит, главным образом, от их характера (растяжение σ_+, сжатие σ_-) и направления относительно вектора напряженности намагничивающего

поля, а также от величины и знака магнитострикции насыщения λ_s.

Магнитноупругая энергия упругодеформированного ферромагнетика

$$E_\sigma = \frac{3}{2}\lambda_s\sigma\sin^2\theta, \qquad (44)$$

где θ — угол между векторами напряжений и спонтанной намагниченности доменов — $\bar{J}_s$.

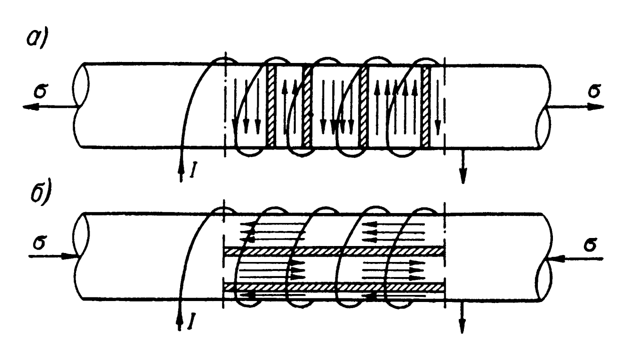


Рис. 57. Ориентация векторов намагниченности доменов в ферритовом стержне, имеющем отрицательную константу магнитострикции: *а* — стержень находится под действием одностороннего растягивающего напряжения; *б* — стержень находится под действием одностороннего сжимающего напряжения.

Если знаки λ_s и σ совпадают, то минимуму E_σ будет соответствовать $\theta = 180°$, если не совпадают, то $\theta = 90°$ (рис. 57, *а, б*) (появление 180° доменных границ объясняется четностью эффекта магнитострикции). При направлении вектора напряжений параллельно намагничивающему полю это в первом случае ведет к увеличению намагниченности и прямоугольности петли гистерезиса, во втором — к уменьшению их. При перпендикулярном направлении, наоборот, возникает анизотропия внешних напряжений. Если величина связанной с ней энергии будет существенно превосходить энергию всех других видов анизотропии и, в первую очередь, энергию кристаллографической магнитной

анизотропии K_1 и анизотропии внутренних напряжений $\frac{3}{2}\lambda_s\sigma_i$:

$$\frac{3}{2}\lambda_s\sigma \gg K_1 + \frac{3}{2}\lambda_s\sigma_i, \qquad (45)$$

то процессы намагничивания будут полностью определяться внешним напряжением. Для этого также необходимо (как показал Дунаев [54]), чтобы отношение $\left(\frac{\lambda_{111}}{\lambda_{100}}\right)$ было достаточно велико.

Чувствительность к действию напряжений снижается присутствием в материале структурных дефектов, включений и пористости. Характеристикой магнитоупругой чувствительности материала может служить величина магнитоупругой проницаемости:

$$\Lambda = \frac{dB}{d\sigma}. \qquad (46)$$

При малых механических напряжениях [3]

$$\Lambda = 2{,}2\,\frac{\lambda_s B_s}{K}\cdot\frac{B_0}{B_s}\left(1 - \frac{B_0^2}{B_s^2}\right), \qquad (47)$$

где B_0 и B_s — индукция, соответствующая намагничивающему полю, и индукция насыщения.

Из выражения (47) следует, что магнитоупругая чувствительность зависит от величины намагничивающего поля. В качестве критериев для оценки магнитоупругих свойств ферритов предлагается использовать величину [55]:

$$\frac{1}{\mu_н}\cdot\frac{\partial\mu_н}{\partial\sigma} = -16\pi^2\,\frac{\mu_н}{E}\cdot\frac{\partial a_0}{\partial B_0}\,(I \to 0;\ \sigma_0 \to 0), \qquad (48)$$

где $\mu_н$ — начальная магнитная проницаемость; E — модуль Юнга; a_0 — динамическая магнитострикция.

Чувствительность тела, характеризующегося размагничивающим фактором N', может быть оценена по формуле

$$\frac{1}{\mu_т}\cdot\frac{d\mu_т}{d\sigma} \approx \frac{1}{\mu_т}\cdot\frac{d\mu}{d\sigma}\cdot\frac{1 - N'}{(1 + \mu N')}, \qquad (49)$$

где μ и $\mu_т$, соответственно, проницаемость вещества и тела;

$$N' = N/4\pi.$$

Если магнитоупругая анизотропия преобладает над другими видами, то для случая сильных упругих напряжений, когда намагничивание идет за счет процессов вращения,

$$\mu_н - 1 = \frac{4\pi J_s^2}{3\sigma\lambda_s}\left(\frac{\rho_x}{\rho}\right)^{\frac{1}{3}}, \tag{50}$$

где ρ_x и ρ, соответственно, рентгеновская и кажущаяся плотности пористого феррита.

Для малых сжимающих и растягивающих напряжений предлагается следующая зависимость [2], определяющая изменение $\mu_н$:

$$\mu_\sigma = (\mu_н - 1)\left[1 + 0{,}072\lambda_s\sigma(\mu_н - 1)\frac{1}{J_s^2}\right] \tag{51}$$

(при сжатии σ имеет знак минус).

На рис. 58 представлена типичная зависимость основных магнитных параметров магнитномягких ферритов от сжимающих и растягивающих напряжений, действующих в направлении рабочего поля. Видно характерное увеличение начальной магнитной проницаемости при малых напряжениях с последующим уменьшением ее при больших.

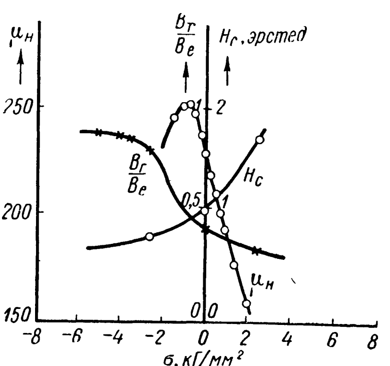


Рис. 58. Зависимость начальной проницаемости $\mu_н$, относительной остаточной индукции B_r/B_l и коэрцитивной силы H_c от внешних напряжений для поликристаллического стержня состава $Ni_{0,5}Zn_{0,5}Fe_2O_4$.

Некоторые авторы [55] объясняют это эффектом Виллари [3], заключающемся в изменении знака магнитострикции. Более точное толкование наличия «макс» получило в работах Вонсовского [34], по которому для поликристаллических ферромагнетиков с отрицательной λ_s имеем

$$\chi_{a\perp(\sigma)} = \chi_{a\perp(0)} - \frac{a}{\sigma_i^2}\sigma - \frac{b}{\sigma_i^3}\sigma^2, \tag{52}$$

где $\chi_{a\perp}$ — магнитная восприимчивость, обусловленная 90° смещением границ; «a» и «b» — константы для данного распределения магнитных фаз; σ_i и σ — соответственно, внутренние напряжения в образце и напряжения от внешних нагрузок.

При сжатии (σ_-) или, в случае магнитной текстуры, при растяжении второй член выражения (52) становится отрицательным, что при малых величинах напряжений вначале будет приводить к росту $\chi_{a\perp}$. Максимум ее значения поступает при нагрузках $\sigma \sim \sigma_i$ [57, 58].

Влияние внешних напряжений на коэрцитивную силу может быть оценено по следующей упрощенной зависимости [34]:

$$H_c \sim a\frac{K_1}{J_s} + b\frac{\lambda_s \sigma_i}{J_s} + c\frac{\lambda_s \sigma}{J_s}. \quad (53)$$

При больших величинах константы кристаллографической магнитной анизотропии K_1 и внутренних напряжений σ_i влияние внешних напряжений будет мало и наоборот.

С описываемыми выше эффектами тесно связан эффект механострикции. Заключается он в изменении величины модуля Юнга E при намагничивании образца. Объясняется это тем, что при намагничивании образца появляется дополнительная магнитострикционная деформация. Материалы, обладающие большой механострикцией, строго говоря, не подчиняются закону Гука. В общем случае, согласно [3], изменение модуля упругости может быть оценено выражением

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{9\mu_{\text{н}} E_s \lambda_s^2}{20\pi J_s^2}. \quad (54)$$

Изложенные выше основные теоретические положения и приведенные аналитические зависимости, правильно отражая качественную сторону явлений, не позволяют, однако, производить достаточно точную количественную их оценку. Причина этого состоит в том, что магнитоупругие эффекты относятся к так называемым структурно-чувствительным эффектам. В реальных образцах материала приведенная выше картина чрезвычайно осложняется влиянием всякого рода побочных структурных факторов, учесть которые на существующем уровне развития теории невозможно.

По этой причине единственным методом получения количественных зависимостей для конкретных материалов и изделий является метод экспериментальных исследований.

§ 10. Методы исследований

Исследования влияния механических напряжений на электромагнитные параметры ферритов производятся по различной методике. Лучшим способом создания однородных, равномерно распределенных в образце напряжений в направлении рабочего поля является растяжение и сжатие ферритовых стержней [55, 56, 69, 70, 71].

При этом измерения параметров образца производятся на баллистической установке с помощью пермиаметра, ярмо которого одновременно является частью устройства для растяжения (сжатия) и изготавливается из двух перемещающихся относительно друг друга частей, закладываемых в реверс разрывной машины. Для уменьшения влияния на результаты измерений полей рассеивания в качестве материала ярма выбирается высокопроницаемый материал (например, Армко), а сборка его частей производится с минимальными зазорами. На обе части ярма симметрично наматываются намагничивающие катушки. Образец с измерительной обмоткой закрепляется между полюсами ярма строго по оси пермиаметра. Для контроля характера и величины возникающих в образце напряжений используются наклеенные на образец проволочные тензометры.

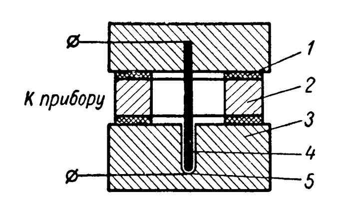


Рис. 59. Схема устройства для исследования влияния сжимающих напряжений, перпендикулярных направлению намагничивающего поля.

1 — резиновая прокладка; *2* — ферритовый сердечник; *3* — текстолитовая шайба; *4* — намагничивающий провод; *5* — гнездо.

Технически более простым способом, особенно при измерениях в переменных полях, является использование торроидальных образцов. Измерения при этом производятся как при помощи нанесения на сердечник измерительной обмотки, так и путем намагничивания концентричным оси сердечника полем по одновитковому методу. Последний способ предпочтительней, так как

позволяет избежать передачи усилий через витки обмотки, создающие в местах соприкосновения с сердечником концентрированные местные напряжения.

На рис. 59 изображена схема устройства, применяющегося для исследования влияния сжимающих напряжений, перпендикулярных направлению рабочего поля. Устройство закладывается в реверс разрывной машины. Сжимающее усилие передается через текстолитовые шайбы. Резиновые прокладки обеспечивают равномерность распределения усилия p.

Сжимающие и растягивающие тангенциальные напряжения, совпадающие по направлению с рабочим полем, создаются в торроидальных образцах за счет давления по внешней и внутренней цилиндрическим поверхностям. Расчет величин тангенциальной σ_τ и радиальной $\sigma_н$ составляющих напряжений ведется по формулам теории упругости [66].

Средние (по сечению кольца) напряжения при растяжении:

$$\bar{\sigma}_{\tau(+)} = \frac{pr}{R-r}; \quad \bar{\sigma}_{н(-)} = \frac{pr}{R+r}; \tag{55}$$

при сжатии:

$$\bar{\sigma}_{\tau(-)} = \frac{pR}{R-r}; \quad \bar{\sigma}_{н(-)} = \frac{pR}{R+r}, \tag{56}$$

где R — наружный; r — внутренний радиус сердечника.

Отношение $\frac{\bar{\sigma}_\tau}{\bar{\sigma}_н} = \frac{R+r}{R-r}$, откуда следует, что при малых соотношениях R/r влиянием $\sigma_н$ можно пренебречь.

Для такого рода испытаний могут использоваться приспособления, изображенные на рис. 60, 61. Давление на цилиндрические поверхности образцов создается за счет сжатого газа или жидкости, нагнетаемых в резиновые трубки. При сжатии (рис. 60) давление подается в трубку, заключенную между наружной поверхностью образца и корпусом приспособления, который не позволяет ей расшириться. При растяжении (рис. 61) трубка плотно продевается через отверстие кольца. Корпуса штуцеров и шайбы предохраняют ее от разрыва. Подобные же приспособления описаны в [68]. Кроме того, такие давления могут создаваться при помощи металлических, стягивающих хомутов с резиновой подложкой

[73]; стеклянных колец, наплавленных на сердечниках при высокой температуре; металлических оправок, вкладываемых в охлажденном состоянии внутрь или надеваемых в нагретом состоянии снаружи; погружением сердечников с измерительной намоткой в расплавы смол [67].

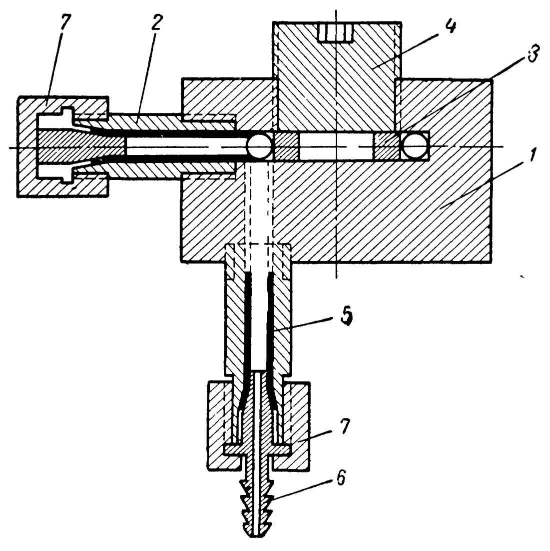


Рис. 60. Приспособление для сжатия кольцевых ферритовых сердечников давлением по внешней цилиндрической поверхности.

1 — текстолитовый корпус; *2* — штуцер-заглушка; *3* — ферритовый сердечник; *4* — пробка; *5* — резиновая трубка; *6* — штуцер; *7* — накидные гайки.

При исследовании влияния всестороннего сжатия сердечники с намоткой помещаются в сосуд, в который под давлением накачивается масло. Для создания высоких давлений порядка тысяч атмосфер сердечники заплавляются в металл или замораживаются в воде [50, 60, 65].

При проведении исследований применяются обычные приборы и схемы, используемые для измерений электромагнитных параметров ферритов. Для регистрации быстропротекающих процессов следует рекомендовать установку измерения дезаккомодации, описанную в [10].

При снятии зависимостей электромагнитных параметров от механических напряжений нагрузку на образец, как правило, изменяют по ступеням. После установления определенной величины нагрузки наблюдается «ползучесть» измеряемого параметра. Поэтому на каждой ступени нагружения замер производится через некоторое время, необходимое для его стабилизации.

При исследованиях, проводимых в постоянных полях, необходимо учитывать, что результаты воздействия механических напряжений зависят от последовательности наложения на образец магнитного поля и напряжений. Действие напряжений усиливается, если они накладываются до намагничивания образца, что, кстати говоря, и представляет наибольший практический интерес. Для получения достоверных данных испытаниям следует подвергать предварительно размагниченные образцы.

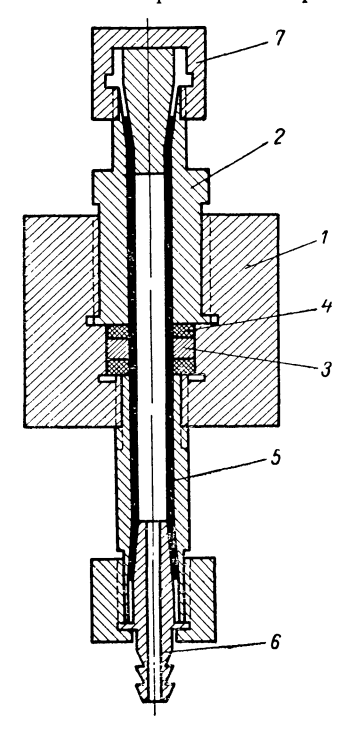


Рис. 61. Приспособление для растяжения кольцевых ферритовых сердечников давлением по внутренней цилиндрической поверхности.
1 — текстолитовый корпус; *2* — штуцер-заглушка; *3* — ферритовый сердечник; *4* — шайба; *5* — резиновая трубка; *6* — штуцер; *7* — накидные гайки.

§ 11. Экспериментальные данные

А. Влияние всестороннего гидростатического давления

Результаты исследований приведены в работах [50, 51, 59—65]. Малые давления до 100 $кГ/см^2$ на электромагнитные параметры ферритов практически не влияют. Исследования проводились при высоких давлениях по-

рядка тысяч атмосфер. Отмечается изменение величины намагниченности насыщения (ΔJ_s). При этом температура точки Кюри растет [59]. Магнитная восприимчивость ($\varkappa$) и начальная магнитная проницаемость в слабых полях падает. Для некоторых ферритов вначале наблюдается незначительный рост этих величин. В сильных полях $\varkappa$ растет [50], что объясняется отрицательной величиной объемной магнитострикции вращения [53].

Во всех случаях наблюдается снижение остаточной индукции B_r и увеличение коэрцитивной силы. Величина $\operatorname{tg} \delta_\mu$ при давлении до 100 *атм* незначительно растет, затем снижается [61].

В работе [50] отмечается усиление температурной зависимости и μ и H_c в слабых полях. При давлениях до 500 *атм* наблюдалось превращение анормальных петель гистерезиса (узкой, прямоугольной и перминварной) в нормальные [62]. Предполагается, что при воздействии гидростатического давления на пористые ферриты на порах возникают тангенциальные напряжения, вызывающие сложно-напряженное состояние материала. Эти напряжения также могут явиться причиной изменения параметров. Во всех проводимых исследованиях изменения параметров носили упругий характер. После снятия давлений значения параметров возвращались к первоначальной величине.

Б. Влияние односторонних механических напряжений на форму петли гистерезиса

Типичные для ферритов зависимости формы петли гистерезиса от односторонних механических напряжений представлены на рис. 62 и 63. Для ферритов с отрицательной магнитострикцией сжимающие напряжения увеличивают прямоугольность и снижают коэрцитивную силу; растягивающие напряжения оказывают обратное действие. При этом растет величина B_r и отношение B_r/B_s. Для ферритов с положительной магнитострикцией знаки влияния меняются на противоположные. В работе [67] предлагается получать прямоугольную петлю у ферритов с отрицательной магнитострикцией, создавая в них сжимающие тангенциальные напряжения с помощью наплавляемого стеклянного кольца или заливая сердечники эпоксидной смолой.

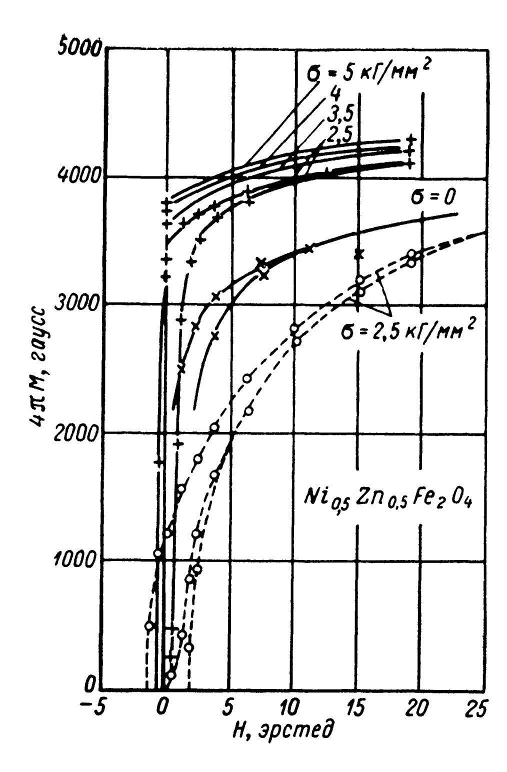


Рис. 62. Изменение гистерезисных петель поликристаллического образца феррита $Ni_{0,5}Zn_{0,5}Fe_2O_4$ с отрицательной магнитострикцией под действием приложенных напряжений. Сплошные линии соответствуют сжимающим напряжениям, пунктирная — растягивающему.

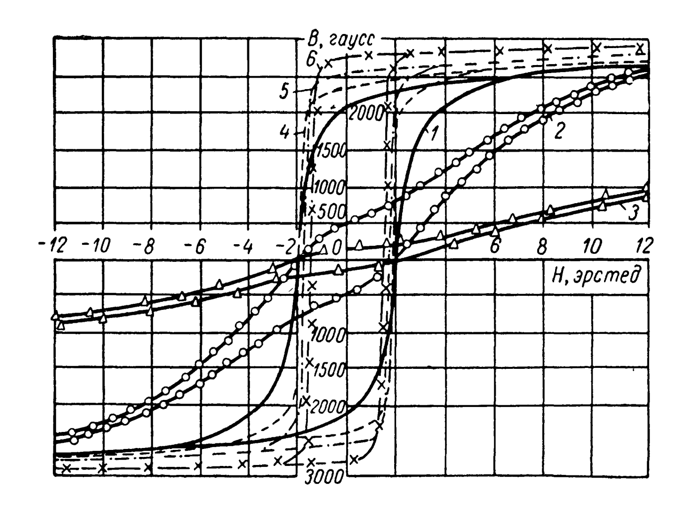


Рис. 63. Изменение гистерезисных петель для феррита $(NiO)_{0,98}(CoO)_{0,02}Fe_2O_3$ при различных значениях внешних растягивающих и сжимающих напряжений.

1 — σ = 0; *2* — $\sigma_+ = 40$ *кГ/см²*; *3* — $\sigma_+ = 180$ *кГ/см²*; *4* — $\sigma_- = 25$ *кГ/см²*; *5* — $\sigma_- = 50$ *кГ/см²*; *6* — $\sigma_- = 100$ *кГ/см²*.

На магнитные параметры магнитножестких ферритов бария и кобальта, вследствие большой величины константы кристаллографической магнитной анизотропии последних, малые механические напряжения практически не влияют. Данные о влиянии механических напряжений на форму петли гистерезиса приводятся также в работах [2, 61, 67, 68].

В. Влияние односторонних механических напряжений на параметры магнитномягких ферритов

Зависимость величины начальной магнитной проницаемости ферритов от односторонних механических напряжений

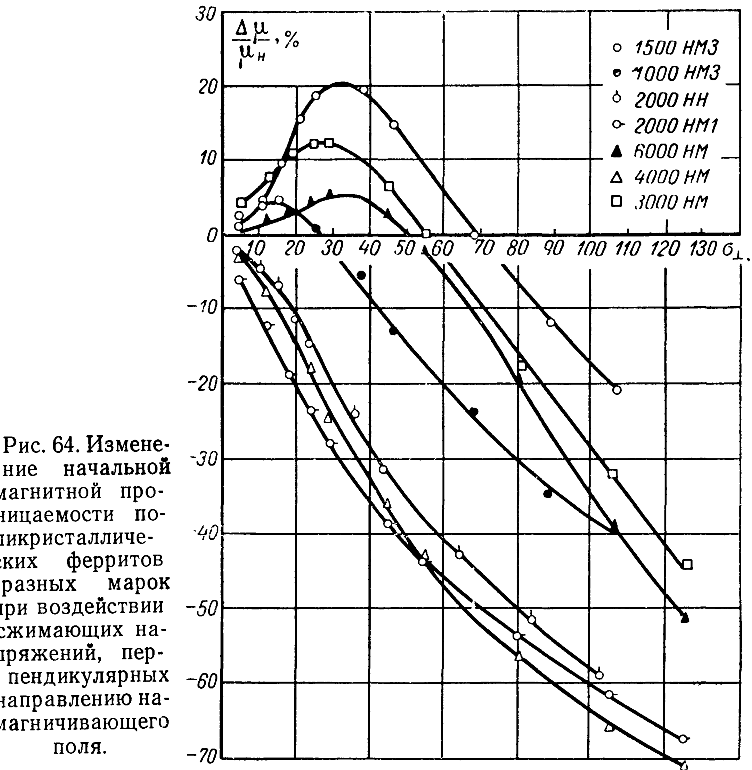


Рис. 64. Изменение начальной магнитной проницаемости поликристаллических ферритов разных марок при воздействии сжимающих напряжений, перпендикулярных направлению намагничивающего поля.

исследовалась целым рядом авторов [10, 38, 56, 67, 69—73, 80]. На рис. 64—66 представлены зависимости изменения величины начальной магнитной проницаемости

(в слабых полях) некоторых марок ферритов от сжимающих (σ_-) и растягивающих (σ_+) напряжений, действующих перпендикулярно и параллельно рабочему полю. Полученные зависимости являются средними для большого числа образцов и характеризуются большим разбросом, зависящим от характера распределения внутренних напряжений, пористости, дефектов и включений.

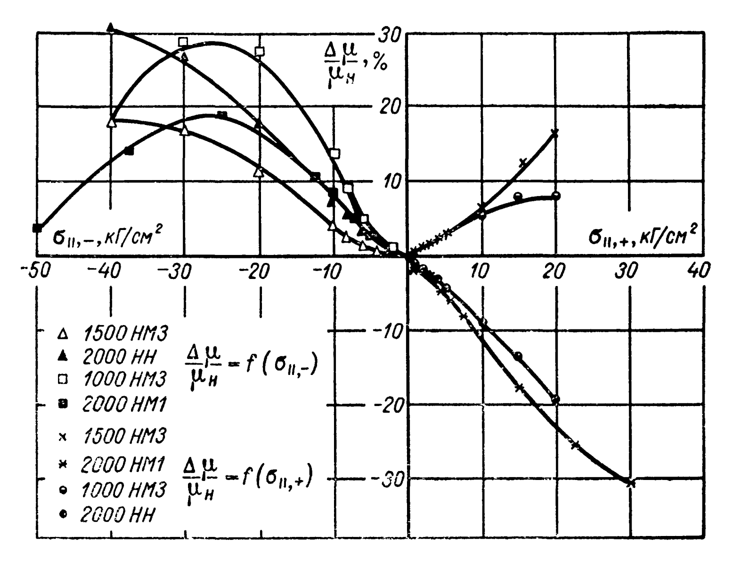


Рис. 65. Изменение начальной магнитной проницаемости поликристаллических ферритов разных марок при воздействии сжимающих и растягивающих напряжений, параллельных направлению намагничивающего поля.

Зависимости эти получены авторами на торроидальных образцах размером 20×10×5 *мм*. Замеры величин $\mu_н$ для низкочастотных материалов производились на частоте $f=1\div10$ *кгц*, $H=5$ *мэ*. Для высокочастотных материалов $\mu_н$ замерялось на частотах $1\div10$ *Мгц*. Наиболее чувствительными являются низкочастотные марки, имеющие малые величины констант кристаллографической магнитной анизотропии и магнитострикции насыщения. У высокочастотных марок эти константы имеют сравнительно большие величины, и поэтому их чувствительность к напряжениям низка.

Анализ графиков рис. 64 и 65 показывает, что знак изменения $\mu_н$ зависит от знака напряжений и их направления относительно направления намагничивающего

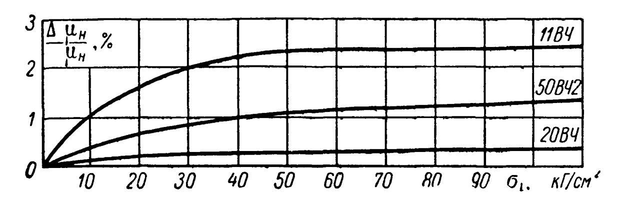


Рис. 66. Изменение начальной магнитной проницаемости поликристаллических высокочастотных ферритов при воздействии сжимающих напряжений, перпендикулярных направлению намагничивающего поля.

поля. В то же время абсолютная величина изменения $\mu_н$ при малых напряжениях не зависит от характера напряжений. При сильных напряжениях (более 50 *кГ/см²*) величина во всех случаях снижается.

Описываемый эффект обратим. Из рис. 67 видно, что при снятии напряжений величина начальной магнитной проницаемости мгновенно возвращается к исходному значению. При этом наблюдается некоторое превышение его, зависящее от величины нагрузки. Этот эффект носит дезаккомодационный характер и с течением времени медленно исчезает [81].

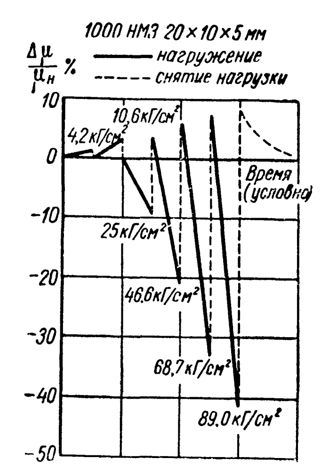


Рис. 67. Характер обратимости изменения начальной магнитной проницаемости при воздействии механических напряжений.

Зависимость величины $tg\,\delta_\mu$ и добротности для некоторых марок ферритов от сжимающих напряжений, перпендикулярных направлению поля, представлена на рис. 68 и 69. Сравнение рисунков 64 и 68, 66 и 69 показывает, что изменение потерь имеет в основном такой же характер, как и изменения проницаемости. Особенно это относится к ферритам с высоким

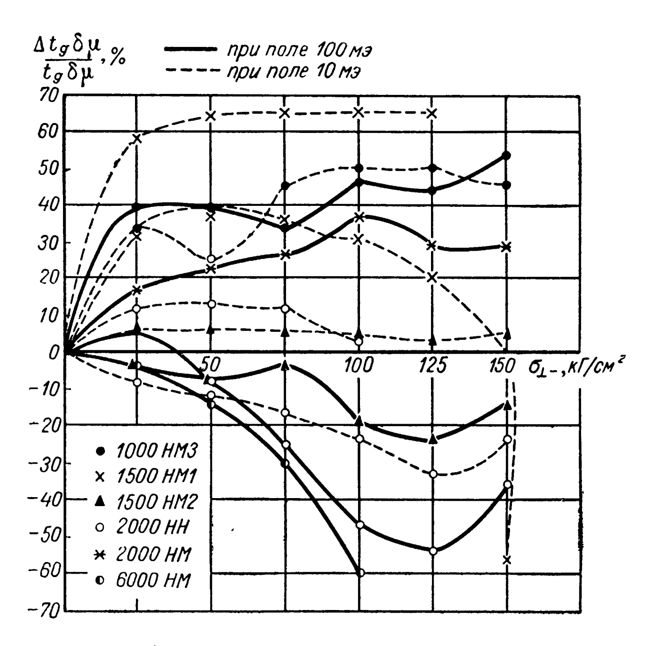


Рис. 68. Изменение величины $tg\delta_\mu$ для некоторых марок поликристаллических ферритов при воздействии сжимающих напряжений, перпендикулярных направлению намагничивающего поля.

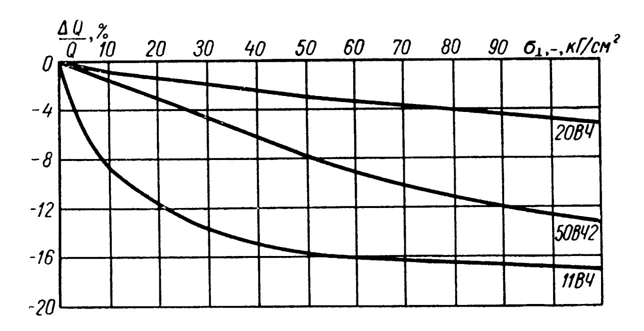


Рис. 69. Изменение величины добротности высокочастотных кольцевых ферритовых сердечников с намоткой при воздействии сжимающих напряжений, перпендикулярных направлению намагничивающего поля.

Таблица 14

Влияние растягивающих усилий на $\mu_н$ и $tg\delta_\mu$ феррита

Напряжение, *кГ/см²*	Параметр	Частота *F, Мгц*					
		0,5	1	3	5	10	15
0	$\mu_н$	640	640	530	390	220	160
	$tg\delta_\mu$	0,04	0,15	0,45	0,65	1,0	—
130	$\mu_н$	490	490	470	410	300	250
	$tg\,\delta_\mu$	0,04	0,1	0,25	0,35	0,48	0,52
270	$\mu_н$	320	320	320	290	250	230
	$tg\,\delta_\mu$	0,03	0,06	0,17	0,25	0,32	0,37

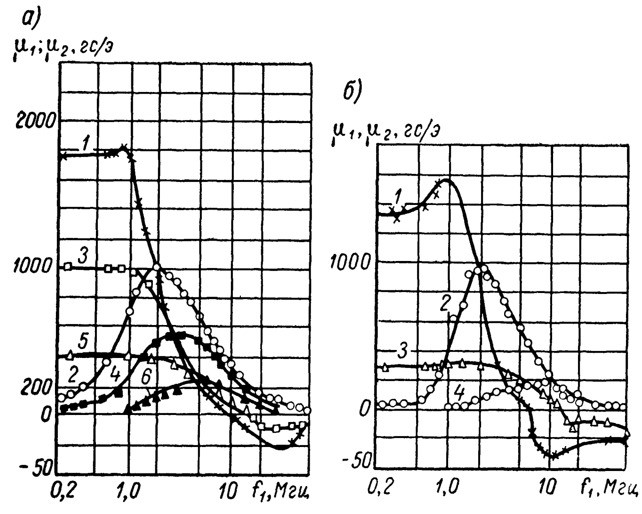
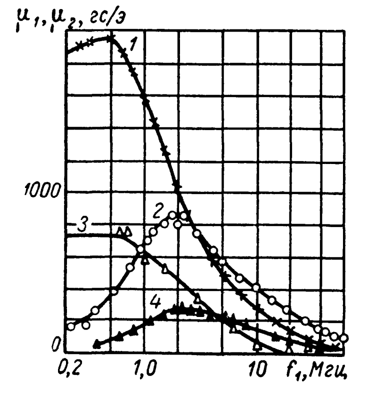


Рис. 70. Магнитные спектры тела марганец-цинковых ферритов типа М-2000 (*а*) и М-1000 (*б*) при различных внешних сжимающих напряжениях.

1 и *2* — $\sigma = 0$ *кГ/см²*; *3* и *4* — $\sigma = 14$ *кГ/см²*, *5* и *6* — $\delta = 44$ *кГ/см²*, (*1, 3* и *5* — кривые дисперсии; *2, 4* и *6* — абсорбции)

значением $\mathrm{tg}\,\delta_\mu$ и высокочастотным ферритам. С увеличением намагничивающего поля влияние напряжений ослабевает.



Воздействие механических напряжений на $\mu_н$ и $\mathrm{tg}\,\delta_\mu$ зависит также от частоты. В табл. 14 эта зависимость показана на примере феррита состава $Ni_{0,36}Zn_{0,64}Fe_2O_4$ [2, 10].

Рис. 71. Магнитные спектры вещества никель-цинкового феррита НЦ-2000 при различных внешних сжимающих напряжениях (обозначения см. на рис. 70).

Влияние механических напряжений на радиочастотные магнитные спектры ферритов исследовались в работах [2, 64, 70, 71, 73]. По данным работы [73], при тангенциальном сжатии тор-

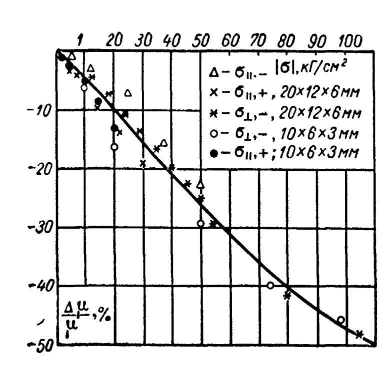


Рис. 72. Изменение импульсной магнитной проницаемости кольцевых ферритовых сердечников марки 1000НМ3 при воздействии сжимающих и растягивающих напряжений, перпендикулярных и параллельных направлению намагничивающего поля $H = 1$ э.

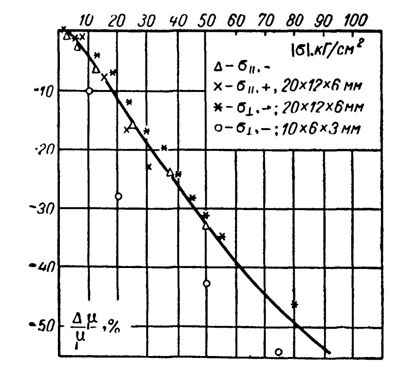


Рис. 73. Изменение импульсной магнитной проницаемости кольцевых ферритовых сердечников марки 1500НМ1 при воздействии сжимающих и растягивающих напряжений, перпендикулярных и параллельных направлению намагничивающего поля $H = 1$ э.

роидальных образцов спектры MnZn ферритов смещаются к высоким частотам (рис. 70, *а*, *б*), Ni·Zn — к низким (рис. 71).

Влияние сжимающих и растягивающих напряжений на величину импульсной магнитной проницаемости иллюстрируется рис. 72, 73. Зависимости были получены авторами на торроидальных образцах размером 20×10×5 *мм*. Измерения величины μ_u производилось в поле $H = 1$ *э* при частоте следования импульсов 10 *кгц*. Независимо от характера напряжения при их увеличении наблюдается снижение величины μ_u практически по линейному закону [74].

Чувствительность к действию механических напряжений у материала с бóльшей магнитной проницаемостью — 1500 НМ1 (рис. 73) больше, чем у материала с меньшей проницаемостью — 1000 НМ3 (рис. 72). Влияние механических напряжений на величину динамической магнитной проницаемости исследовалось в работах [55, 68]. Характер зависимостей аналогичен зависимостям от механических напряжений начальной магнитной проницаемости.

Г. Влияние механических напряжений на свойства СВЧ-ферритов

Упругие напряжения влияют на ферромагнитное резонансное поглощение [76]. Наблюдается увеличение ширины кривой ферромагнитного резонанса при возрастании величины упругих сжимающих напряжений. На рис. 74 представлена зависимость приращения величины подмагничивающего поля δH, необходимого для резонанса, от величины σ_-. Исследования производились на цилиндрических образцах поликристаллического никелевого феррита. Образец помещался в прямоугольный

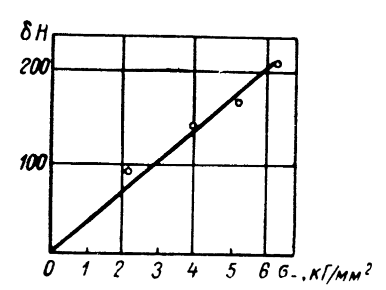


Рис. 74 Приращение величины подмагничивающего поля в зависимости от сжимающих напряжений.

волновод и нагружался с помощью рычагов. Измерения проводились на частоте 9000 *Мгц* по методике, обычной для изучения ферромагнитного резонанса.

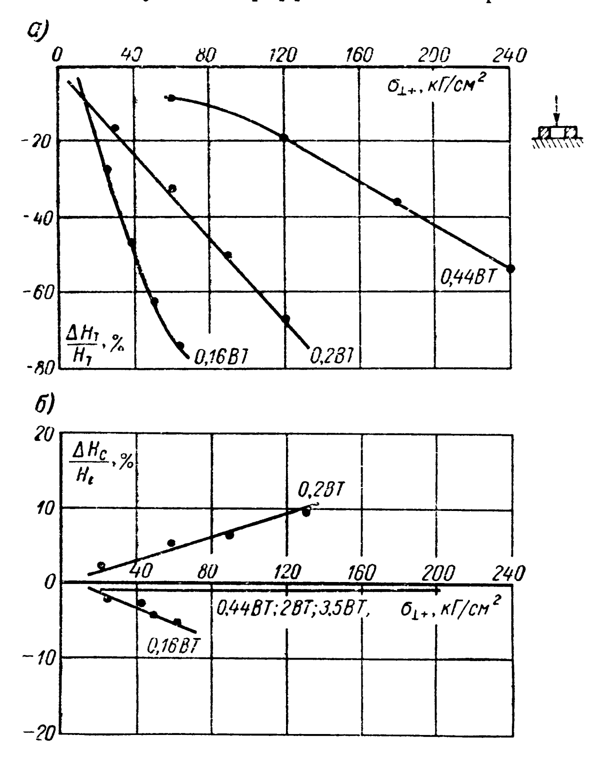


Рис. 75. Зависимость статических параметров некоторых марок ферритов с ППГ от механических напряжений: *а* — зависимость величины поля трогания; *б* — зависимость величины коэрцитивной силы.

Предлагается следующая зависимость резонансной частоты от величины напряжений:

$$\omega_{\text{рез}} = \gamma \left[H + 2\pi I_s + \frac{3\lambda\sigma}{I_s} \right]. \tag{57}$$

Описанный в [76] метод может быть использован для определения коэффициента магнитострикции λ. Экспериментальные данные по определению λ этим методом хорошо совпадают с расчетными.

Д. Влияние механических напряжений на параметры ферритов с ППГ

К ферритам с ППГ полностью относится все сказанное о влиянии механических напряжений на форму петли гистерезиса. Некоторые данные о влиянии меха-

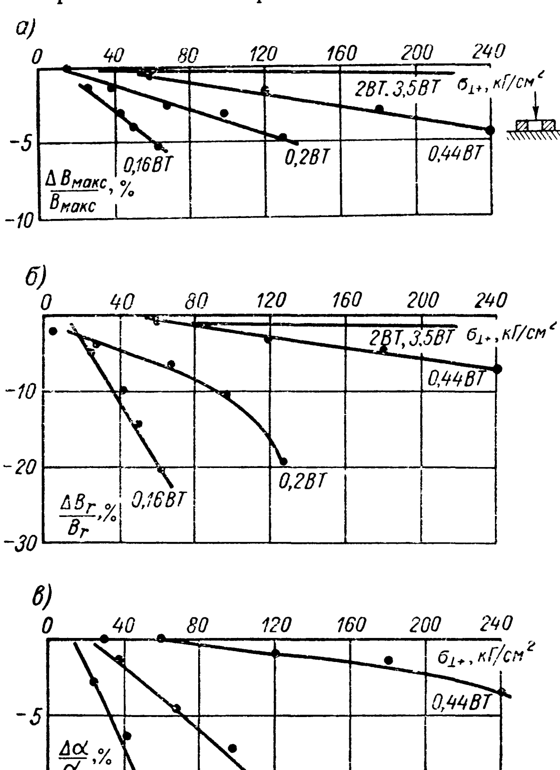


Рис. 76. Зависимость статических параметров некоторых марок ферритов с ППГ от механических напряжений. *а* — зависимость максимальной магнитной индукции; *б* — зависимость остаточной магнитной индукции, *в* — зависимость коэффициента прямоугольности.

нических напряжений на параметры конкретных ферритов с ППГ приводятся в работах [77—79]. На рис. 75—77 приведены зависимости статических и импульсных

параметров некоторых отечественных марок ферритов от сжимающего напряжения, перпендикулярного намагничивающему полю. Зависимости для поля трогания

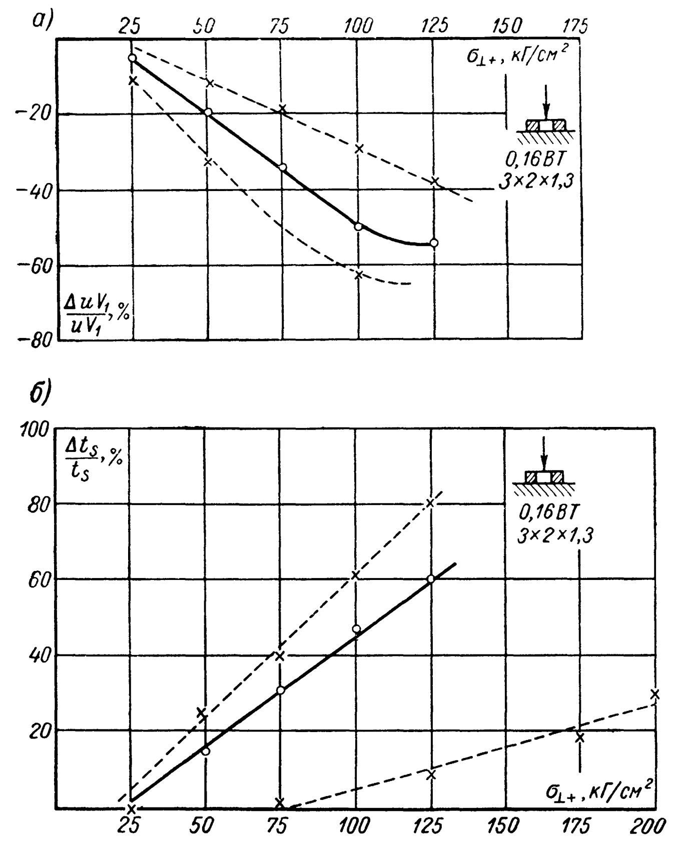


Рис. 77. Зависимость импульсных параметров феррита марки 0,16ВТ от механических напряжений; *а* — зависимость сигнала неразрушенной единицы; *б* — зависимость времени перемагничивания.

и коэрцитивной силы приведены на рис. 75, *а, б*; зависимость для максимальной индукции, остаточной индукции и коэффициента прямоугольности — на рис. 76, *а, б, в*; зависимость для сигнала неразрушенной единицы и времени перемагничивания — на рис. 77, *а. б*. На всех ри-

сунках представлены средние зависимости, полученные по результатам испытаний большого количества сердечников. Чувствительность к механическим напряжениям различных марок различна.

Наибольшей чувствительностью обладают марки с меньшим значением коэрцитивной силы H_c (например, 0,16 *вт*). Все зависимости в некотором интервале нагрузок имеют прямолинейный характер и обладают некоторым порогом чувствительности. Для сердечников с большей чувствительностью предел прямолинейности и порог чувствительности сдвигаются в сторону меньших нагрузок. Изменения всех параметров носят упругий характер вплоть до величин напряжений, близких к пределам прочности. Снижение величины максимального рабочего поля и увеличение температуры повышают чувствительность сердечников к действию механических напряжений. В работе [77] отмечается снижение этой чувствительности при увеличении пористости феррита.

Е. Эффект встряски

Эффект встряски заключается в специфичности воздействия на ферромагнитные материалы ударов и вибраций. Известно, например, что металлические магниты размагничиваются от удара, тогда как статические механические нагрузки на их намагниченность не влияют. Необратимый характер воздействия встряски связан с наличием в ферромагнетике магнитных структур, характеризующихся энергетическим состоянием неустойчивого равновесия.

Причиной такого состояния может служить разнофазовость механической структуры, наличие в ней включений, примесей, дефектов и т. п. Проходящая через образец в момент встряски упругая волна переводит его магнитную структуру в состояние, соответствующее ближайшему минимуму энергии, что и вызывает необратимое изменение магнитных параметров. Из ферритовых материалов эффект встряски наблюдался только у Ni—Zn ферритов [69].

У образцов состава $Ni_{0,36}Zn_{0,64}Fe_2O_4$ и $Ni_{0,5}Zn_{0,5}Fe_2O_4$ после ударов величина начальной магнитной проницаемости уменьшалась на $10 \div 15\%$, у Mn—Zn ферритов, магнитов феррита кобальта и бария эффект этот не

наблюдался. Для ферритов прочих составов экспериментальные данные в литературе не встречаются.

Если эффект встряски отсутствует, то воздействие ударов, вибраций и центробежных ускорений может быть сведено к действию статических механических нагрузок [52]. Следует отметить, что параметры вибраций ударов и центробежных ускорений, такие, как частота и величина динамической перегрузки в ед. g, сами по себе не говорят о силе их воздействия на образец, так как характер и величина возникающих при этом нагрузок зависит от способа передачи вибраций и ударов образцу.

Заключение

Использование ферритов в условиях воздействия механических нагрузок ставит вопрос об определении их допустимых величин. При выборе этих величин мы должны учитывать как механическую прочность ферритов, так и устойчивость параметров к воздействию механических напряжений. Нагрузки, действующие на ферриты, можно разбить на две группы:

рабочие нагрузки, действующие на ферриты, находящиеся в рабочем состоянии, например, во время замеров их электромагнитных параметров, или если ферриты находятся в составе включенного в работу изделия;

нерабочие нагрузки, действующие на неработающие ферриты.

Рабочие нагрузки не должны вызывать недопустимого изменения электромагнитных параметров во время своего действия. Нерабочие нагрузки в это же время могут вызывать любые изменения параметров и важно только, чтобы после их действия значения параметров вернулись к исходному значению.

Назовем пределом устойчивости параметров $\sigma_{уст.\,пар}$ — величину, вызванную механической нагрузкой напряжения, превышение которой приводит к недопустимому изменению электромагнитных параметров во время действия нагрузки, а пределом упругости параметров $\sigma_{упр.\,пар}$ — величину напряжений, превышение которой приводит к недопустимому остаточному изменению электромагнитных параметров после снятия с феррита механической нагрузки.

Обе эти величины в отличие от предела механической прочности $\sigma_{п.ч}$ не являются характеристиками материала и в каждом конкретном случае применения определяются исходя из величин допустимого в этих случаях изменения параметров по их зависимостям от механических напряжений. При этом следует учитывать, что зависимость для конкретного изделия может отличаться от зависимости для материала из-за влияния размагничивающего фактора (см., например, формулу 49). Зная величины $\sigma_{п.ч}$, $\sigma_{уст.пар}$ и $\sigma_{упр.пар}$, можем рассчитать величины допустимых рабочих и нерабочих нагрузок.

Если $\sigma_{п.ч}$ значительно превышает $\sigma_{уст.пар}$ или $\sigma_{упр.пар}$, то на первый план выступает задача сохранения в допустимых пределах значений электромагнитных параметров. В этих случаях допустимые рабочие нагрузки рассчитываются исходя из величины $\sigma_{уст.пар}$, а допустимые нерабочие нагрузки исходя из $\sigma_{упр.пар}$. Для всех ферритов $\sigma_{упр.пар} > \sigma_{уст.пар}$, и поэтому нерабочие нагрузки могут иметь бóльшую величину, чем рабочие.

Если же величина $\frac{\sigma_{п.ч}}{n}$ (где n — запас прочности) равна или меньше предела устойчивости и упругости параметров:

$$\frac{\sigma_{п.ч}}{n} \leqslant \sigma_{уст.пар}; \tag{58}$$

$$\frac{\sigma_{п.ч}}{n} \leqslant \sigma_{упр.пар}, \tag{59}$$

то соответствующие нагрузки рассчитываются по пределу механической прочности.

Приведенными соображениями следует руководствоваться при использовании материала книги в практике применения ферритов в условиях воздействия механических нагрузок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ребиндер П А Физико-химическая механика. «Знание», 1958.
2. Смит Я., Вейн Х. Ферриты. Перев. с англ. под ред. Ирхина Ю. Н. и Старцевой И. Я. Изд. иностр. лит., 1962
3. Бозорт Р. М. Ферромагнетизм. Перев с англ. под ред. Кондорского Е. И. и Лифшица Б. П. Изд. иностр. лит., 1956.
4. Белов К. П. Упругие тепловые и электрические явления в ферромагнетиках. Гостехиздат, 1957.
5. Фоменко Л. А. Магнитные спектры ферритов. УФН, 1958, т. 14, № 4.
6. Ферриты. Сб. докладов на III Всесоюзном совещании по ферритам. Минск, изд-во АН БССР, 1963.
7. Евсеев В. И. Ферриты. «Электричество», 1955, № 9.
8. Ferroxcube, Katalog by Philips.
9. Фактор З., Гроудный Л., Старый И. и Тишер З. Магнитномягкие материалы. «Энергия», 1964.
10. Шольц Н. Н., Пискарев К. А. Ферриты для радиочастот. «Энергия», 1966.
11. Справочник по электротехническим материалам. Под ред. Корицкого Ю. В. и Тареева Б. М., т. 1, ч. 2. Госэнергоиздат, 1959.
12. Писаренко Г. С., Руденко В. Н., Третьяченко Г. Н. и Трощенко В. Т. Прочность материалов при высоких температурах. Киев, «Наукова Думка», 1966.
13. Злобин В. А., Короткин В. Г., Шукейло Ю. А. Влияние температуры на прочность ферритов при растяжении. Обмен опытом в электронной промышленности, «Электроника», 1968, вып 6.
14. Kerper M. G., Mony L. E., Stiefel M. B. and Holley S. F. „Evoluation of Tevsile, Compressive. Torsional, Transverse and Impad Tests and Correlation of Results of Brittle Cermets“, I of Research of the National Bureau of Standarts, 1958, vol. 61, N 3.
15. Шевандин Е. М., Маневич Ш. С. Эффект масштаба при хрупком разрушении стали. ЖТФ, 1964, т. XVI, вып. 11.
16. Павлушкин Н. М. О прочности спеченного корунда. «Стекло и керамика», 1957, № 7.
17. Короткин В. Г. Исследование прочностных и деформационных свойств радиокерамики при изменении температуры. «Вопросы радиоэлектроники», 1965, сер. 3.

18. Александров А. П., Журков С. Н. Явления хрупкого разрыва. Гостехтеориздат, 1933.
19. Weibull W. „Astatistical Theory of the strength of materials“, Ingeniörs Vatenscaps, Academien, Hondlinger, Stokholm, 1939, N 149, 151, 153.
20. Конторова Т. А., Френкель Я. И. Статистическая теория хрупкой прочности реальных кристаллов. ЖТФ, 1941, т. 11, № 3
21. Афанасьев Н. Н. Диаграмма растяжения металлов и их чувствительность к надрезу при переменной нагрузке. ЖТФ, 1941, т. 11, № 4.
22. Волков С. Д. Единая статистическая теория прочности твердых тел. ЖТФ, 1953, т. 23, № 11, 1954, т. 24, № 12.
23 Одинг И. А. Допустимые напряжения в машиностроении и циклическая прочность металлов. Машгиз, 1947.
24. Чертков Г. В. К вопросу о влиянии размеров образцов чугуна на их механические свойства. «Заводская лаборатория», 1961, т. 27, № 3
25. Туричин А. М. Электрические измерения неэлектрических величин. Госэнергоиздат, 1959.
26. Яковлев В. Ф Измерение деформаций и напряжений деталей машин. Машгиз, 1963.
27. Тимошенко С. П Колебания в инженерном деле. Физматгиз, 1967.
28. Дуровкин В. Р. Определение некоторых электрофизических и механических параметров ферритов на одних и тех же образцах. «Электронная техника», 1968, вып. 8.
29. Кингери У Д. Введение в керамику. Стройиздат, 1962.
30. Андреев В. А., Злобин В. А., Короткин В. Г. Зависимость прочности ферритов при кручении от температуры. Обмен опытом в электронной промышленности, «Электроника», 1968, вып. 6.
31. Андреев В. А., Злобин В. А., Короткин В. Г. Влияние масштабно-технологического фактора на ударную прочность магнитномягких ферритов. «Электронная техника», 1967, сер. 14 вып. 8.
32. Акулов Н. С. Ферромагнетизм. Гостехиздат, 1939
33. Becker R., Döring W. Ferromagnetismus. Berlin, 1939.
34. Вонсовский С В., Шур Я. С. Ферромагнетизм. Гостехиздат, 1948.
35. Киттель К. Физическая теория доменной структуры. УФИ, 1950, вып. 8, т. 41, № 4.
36. Сноек Я. Исследования в области новых ферромагнитных материалов. Изд. иностр. лит., 1949.
37 Смоленский Г. А. Ферриты двухвалентных металлов. ДАН, «Химия», 1951, т. 78, № 5.
38 Wijn H. P. I., Gorter E. W., Esveld C. I., Goldermans P. Conditions for square hysteresis Loops in Ferrites. Phil. techn. Rev., 1954, vol. 16, № 2.
39. Bozorth R. M., Tilden E. F., Williams A. I. Anisotsopy and Magnetostriction of Some Ferrites. Phys. Rev., 1955, vol. 99, № 6.

40. Жуков А. И. Температурная зависимость магнитных свойств NiZn и CuZn феррита. ЖТФ, 1954, 24.
41. Bosorth R. M., Walker G. Ct. Magnetostriction of Single Crystal of Cobalt and Nickel Ferrites. Phys. Rev, 1952, vol. 88, № 5.
42. Vountier R. Contribution a L'étude du Phénomene de Magnetostriction. Ann. de Phys., 1954, vol. 9.
43. Смольков Н. А., Талалаева Е. В. Влияние окиси бария на некоторые свойства феррита. ФММ, 1955, т. 1, вып. 3.
44. Усатов В. У., Рябинин В. П., Рурмкина К. К., Смолин Р. П. Константы магнитострикции и магнитной анизотропии магний-марганцевых ферритов. ЖТФ, 1967, т. 37, вып. 9.
45. Аннанаев Р. Г., Кафиев Э. И. Магнитострикция ферритов сложного состава. Сб. «Ферриты». Минск, изд-во АН БССР, 1960.
46. Гарбовский М. А. Магнитострикция естественных и искусственных магнетитов. Изв. АН СССР, сер. География и геофизика, 1950, т. 14, № 6.
47. Белов К. П., Зайцева М. А., Педько А. В. Некоторые особенности магнитного поведения феррита-граната годолиния. Сб. «Ферриты», Минск, изд-во АН БССР, 1960.
48. Акулов Н. С., Волков Д. И. Новый метод измерения магнитострикции. Вестник МГУ, 1949, № 10
49. Розинг Б. А. Об изменении длины железной проволоки при намагничивании Журнал русского физ-хим. общ-ва, 1894, т. 26, вып. 6.
50. Мишин Д. Д., Никонова Л. В., Бычкова Г. И. Влияние всестороннего сжатия и температуры на магнитостатические свойства Ni—Zn ферритов, сборник «Ферриты». Минск, изд-во АН БССР, 1960.
51. Сирота Н. Н, Хачатрян Ю. М. Влияние гидростатического давления на магнитную восприимчивость медно-цинковых ферритов. ФТТ, 1963, т. 5, вып. 11.
52. Злобин В. А., Звороно Ю. С. К вопросу испытаний ферритовых деталей на воздействие механических факторов. «Электронная техника», 1967, сер. 7, вып 3, Ферритовая техника.
53. Вонсовский С. В. Теория ферромагнетизма бинарных сплавов. ЖТФ, 1948, т. XVIII, вып. 2.
54. Дунаев Ф. Н. О магнитной текстуре ферромагнетиков, подвергнутых внешним нагрузкам. Изв. АН СССР, сер. физ., 1961, т 25, № 12.
55. Сыркин Л. Н., Ивукина А. К., Подкуйко Г. С. Исследование магнитноупругого эффекта в ферритах. ФММ, 1962, т. 14, вып 6
56. Сыркин Л. Н Изучение магнитноупругого эффекта в ферритах Изв. АН СССР, сер. физ., 1959, т. 23, № 3.
57. Шур Л. С., Мишин Д. Д. Влияние малых упругих напряжений на начальную восприимчивость ферромагнетиков. Изв. АН СССР, сер. физ, 1952, т. 16, № 6.
58. Дунаев Ф. Н., Гуляева Г. П. Влияние упругого сжатия на начальную обратимую магнитную проницаемость ферромагнетиков. Изв. вузов, «Физика», 1961, № 5.
59. Сирота Н. Н, Хачатрян Ю. М. Влияние гидростати-

ческого давления на температуру Кюри Ni—Cu—Zn ферритов. Докл. АН БССР, 1963, т. 7, № 12.

60. Лазарев Б., Кан Л. Измерения при низких температурах и высоких давлениях. ЖТФ, 1944, 14.

61. Groch G. Uber den Einfluß hoher hydrostatischer Drucke auf einige magnitische Eigenschiften von Ferriten. Z. Angew. Phys., 1963. Bd. 16, Hf. 3.

62. Ross E., Kornetski M. Der Einfluß hydrostatischen Druckes auf die verschiedenen Magnetisierungs—schleifen der Manganan—Zink—Ferrite. Z. Angew. Phys., 1963, Bd. 15, Hf. 1.

63. Alley R. E., Legg V. E. Effects of hydrostatic pressure on the properties of magnetic materials. Ir. Appl. Phys., 1960, vol. 31, N 5.

64. Alley R. E., Shnettler F. I. Effect of Cross-section Area and Compression apon the Relaxation in Permeability for Torroidal Camples of Ferrites. Appl. Phys., 1953, vol. 24, N 21.

65. Adams C. Q., Davis C. M. Effect of Hydrostatic Pressure and Temperature on the Magnetic Properties of a Nikel Zinc ferrite. Appl. Phys., 1958, vol. 29, N 3.

66. Беляев Н. М. Сопротивление материалов, изд. 12. Физматгиз, 1954.

67. Williams H. I., Sherwood R. C., Gevers M., Shnettler F. I. Meckanical stressed Ferrites having rectangular hysteresis Loop. Amer. Inst. Electr. Eng. Transact., 1963, vol. 72, N 1.

68. Голямина И. П., Чулков В. К., Бондаренко Ю. В. Влияние механических напряжений на некоторые магнитные свойства магнитострикционных ферритов. «Физические свойства ферритов». Минск, изд-во АН БССР. 1967.

69. Rathenau G. W., Fast I. E. Initial permeability of sintured ferrites. Phys., 1955, 21.

70. Wijn H. P. I., Gevers M., Van der Burgt C. M. Note on the High Freguency Dispersion in Nickel Zink ferrites. Rev. Mod. Phys., 1953, vol. 25, N 1.

71. Smit I., Wijn H. P. I. Physical Properties of Ferrites. Adv. Electron, Physics, vol. 6, Acad. Press, New York, 1954.

72. Petrescu V., Relezcu N., Maxim Si. Crh. Unele Contributii Privind Effectul Magnetoelastic La Feritele De Nichel—Zinc si Mangan—Zinc. Stud. si Cercetarii de Firico, 1965, vol. 17, N 8.

73. Фоменко Л. А. Влияние механических напряжений на характер радиочастотных магнитных спектров ферромагнитных полупроводников. Сб. «Ферриты». Минск, изд-во АН БССР, 1960.

74. Контарович Л. И. Влияние сосредоточенных механических усилий на магнитные параметры некоторых ферритов. «Вопросы радиоэлектроники», 1962, сер. 3, вып. 6

75. Сыркин А. И., Шамовская М. А., Элькорд А. М. Исследование механических потерь в поликристаллических ферритах. «Физические свойства ферритов». Минск, изд-во АН БССР, 1967.

76. Катюков Ю. И., Бурнышева А. И. Влияние анизотропных упругих напряжений на ферромагнитное резонансное поглощение в никелевом феррите. «Ферриты». Минск, изд. АН БССР, 1960.

77. Cimpl Z. The dependence of the rectangular hysteresis loop on the external stress in manganese — magnisium and manganese ferrites. Czech. Iour. Phys., 1963, vol. 13, N 7, sec. B.

78. Heide H., Bruijning H. G., Wijn H. P. I. Switching time of ferrites with rectangular histeresis loop. Phil. Techn. Rev., 1956, vol. 18, N 11.

79. Иоффе А. Ф., Филиппов Е. И. Измерение параметров ферритовых сердечников с прямоугольной петлей гистерезиса. Госэнергоиздат, 1963.

80. Андреев В. А., Злобин В. А, Короткин В. Г. Изменение добротности и индуктивности в зависимости от напряженного состояния магнитномягких ферритов. Обмен опытом в электронной промышленности. «Электроника», 1968, вып. 2.

81. Злобин В. А., Звороно Ю. С Влияние периодически прилагаемых нагрузок на магнитную проницаемость феррита марки 3000НМ. Обмен опытом в электронной промышленности. «Электроника», 1968, вып. 2.

82. Годик Э. Э., Ормонт Б. Ф. Изв. АН СССР. Неорганические материалы, 1, 1965.

83 Тененбаум М. М. Износостойкость конструкционных материалов и деталей машин. Машиностроение, 1966

84. Гогоберидзе Д. Б. Твердость и методы ее измерения Изд. 2-е, Машгиз, 1952.

85. Макмиллан П. У. Стеклокерамика. Пер. с англ. А. Т. Аладьева и Н. С. Костюкова. «Мир», 1967.

86. Кларк Ф Новейшие методы порошковой металлургии. Пер. с англ. О. А. Алексеева под ред. Г. А. Меерсона. Атомиздат, 1965.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ЗЛОБИН ВЛАДИМИР АЛЕКСЕЕВИЧ
АНДРЕЕВ ВИТАЛИЙ АРКАДЬЕВИЧ
ЗВОРОНО ЮРИЙ СТАВРАСОВИЧ

ФЕРРИТОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Редактор **А. И. Сафонова**
Художественный редактор **Г. А. Гудков**
Технический редактор **О. С. Житникова**
Корректор **В. Н. Миханкова**

Сдано в производство 1/X 1969 г
Подписано к печати 20/XII 1969 г. М-51029.
Печ. л. прив. 5,88. Уч.-изд. л. 5,4. Бум. л. 1,75.
Бумага типографская № 2. 84×108 1/32. Тираж 25 000.
Цена 22 коп. Заказ 2097.

Ленинградское отделение издательства «Энергия», Марсово поле, 1.

Ленинградская типография № 4 Главполиграфпрома Комитета по печати при Совете Министров СССР, Социалистическая, 14.

Цена 22 коп.